

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
ESCUELA DE POSTGRADO
SECCIÓN DE MAESTRÍA**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERIA
AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**

**REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
PRODUCIDAS POR LA BIOMASA DE RESIDUOS ORGÁNICOS
AGROPECUARIOS CHULUCANAS – PIURA**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER EN INGENIERIA
AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**

Blgo. Alberto Zacarias Hurtado Merino

PIURA – PERÚ

Agosto 2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
ESCUELA DE POSTGRADO
SECCIÓN DE MAESTRÍA**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERIA
AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**

TESIS

**REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
PRODUCIDAS POR LA BIOMASA DE RESIDUOS ORGÁNICOS
AGROPECUARIOS CHULUCANAS – PIURA**

LOS SUSCRITOS DECLARAMOS QUE EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS
ES ORIGINAL, EN SU CONTENIDO Y FORMA

Blgo. Alberto Zacarías Hurtado Merino

Tesista

MSc. Ing. GRIMALDO EDMUNDO SAAVEDRA FRÍAS

Asesor

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
ESCUELA DE POSTGRADO**

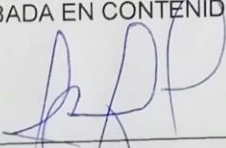
SECCIÓN DE MAESTRÍA




**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERIA
AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**

**REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
PRODUCIDAS POR LA BIOMASA DE RESIDUOS ORGÁNICOS
AGROPECUARIOS CHULUCANAS – PIURA**

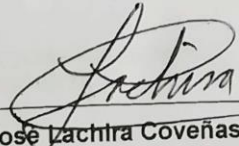
APROBADA EN CONTENIDO Y ESTILO POR:



Dr. Wilson Sancarranco Cordova
Presidente



Dr. César Torres Díaz
secretario



Dr. José Lachira Coveñas
Vocal



ESCUELA DE POSGRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

ACTA DE SUSTENTACIÓN

PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

Los Miembros del Jurado Calificador que suscriben, reunidos para la sustentación de la Tesis, para optar el Grado Académico de Maestro en **INGENIERÍA AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**, presentada por:

HURTADO MERINO – ALBERTO ZACARIAS

Con el asesoramiento del DR. GRIMALDO EDMUNDO SAAVEDRA FRIAS, denominada:

“REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR LA BIOMASA EN RESIDUOS ORGÁNICOS AGROPECUARIOS CHULUCANAS - PIURA”

Oídas las respuestas y absueltas las observaciones formuladas, se declara:

APROBADO				DESAPROBADO
Excelente	Sobresaliente	Bueno	Aceptable	
_____	X	_____	_____	_____

En consecuencia, previa aprobación del Art.º 83, del Reglamento General de la Escuela de Posgrado, queda en condiciones de ser calificado **APTO** para obtener el Grado Académico de **MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL** de conformidad con lo estipulado en la ley.

PIURA, JUEVES 15 DE AGOSTO DEL 2019

DR. WILSON SANCARRANCO CORDOVA
PRESIDENTE

DR. CESAR TORRES DIAZ
SECRETARIO

DR. JOSE LACHIRA COVENAS
VOCAL

“Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad”

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **Alberto Zacarias Hurtado Merino**, identificado con DNI N° **42643059** egresado del **Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial** de la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional de Piura, presento mi informe de tesis titulado:

REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR LA BIOMASA DE RESIDUOS ORGÁNICOS AGROPECUARIOS CHULUCANAS – PIURA

Declaro en honor a la verdad, que el trabajo de tesis es de mi autoría; que los datos, los resultados y su análisis e interpretación, constituyen mi aporte. Todas las referencias han sido debidamente consultadas y reconocidas en la investigación.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad u ocultamiento de la información aportada. Por todas las afirmaciones, ratifico lo expresado, a través de mi firma correspondiente.

Piura, 02 de agosto de 2019

Blgo. Alberto Zacarias Hurtado Merino
Tesista

A mi esposa y mis padres por su apoyo incondicional...

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios todo poderoso por brindarme la vida y los conocimientos adquiridos a lo largo de mi desempeño profesional.

Al Ing. Grimaldo Saavedra Frías por sus aportes en esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	i
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPITULO I.....	13
ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.3. HIPÓTESIS.....	15
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.5. OBJETIVOS.....	16
1.5.1. Objetivo General.....	16
1.5.2. Objetivos Específicos.....	16
1.6. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
CAPITULO II	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.2. MARCO LEGAL	22
2.2.1. Marco Legal Nacional	22
2.2.2. Marco Legal Municipal	24
2.3. BASES TEÓRICAS.....	25
2.3.1. Residuos orgánicos biodegradables.....	25
2.3.2. Residuos Agropecuarios.....	29
2.3.3. Fermentación anaerobia.....	33
2.3.3.1. Factores físicos y químicos	34
2.3.4. Fundamentos de la fermentación metanogénica	36
2.3.5. Procesos de biodigestión.....	45
2.3.6. Biodigestor	49
2.3.7. Biogás.....	53
2.3.7.1. Factores que afectan la producción de biogás	54
2.3.8. Producción de biogás.....	56

CAPITULO III.....	58
MARCO METODOLÓGICO	58
3.1. ENFOQUE Y DISEÑO.....	58
3.1.1. Enfoque.....	58
3.1.2. Diseño	58
3.1.3. Nivel.....	59
3.1.4. Tipo.....	59
3.2. SUJETOS DE LA INVESTIGACIÓN	59
3.3. VARIABLES.....	60
3.4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	60
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	61
3.6. FUENTES	61
3.7. ASPECTOS ÉTICOS.....	62
CAPÍTULO IV	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.1. DISTRITO DE CHULUCANAS	63
4.2. ACTIVIDADES AGRÍCOLAS	64
4.3. ACTIVIDADES GANADERAS	66
4.4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	66
4.4.1. Primera fase: Producción de biogás por digestión anaerobia de residuos celulósicos, excretas de vaca y cerdo.....	66
4.5. RESULTADOS	77
4.5.1. Formulación de la mezcla adecuada de residuos celulósicos, excretas de vaca y cerdo con una relación C:N de 25:1	77
4.5.2. Producción de biogás a partir de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos.....	78
4.5.3. Usos potenciales de biogás por parte de los pobladores de Chulucanas	81
4.6. DISCUSIÓN.....	84
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO 1: Determinación de la relación C:N	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Composición química del estiércol de ganado vacuno	33
Tabla 2 2	Composición química del biogás.....	53
Tabla 2. 3	Valores aproximados de pH y su efecto en la obtención de biogás	54
Tabla 4. 1	Relación de carbono/nitrógeno de cada uno de los sustratos y mezcla total	77
Tabla 4. 2	Porcentaje de humedad y sólidos totales de la mezcla de sustratos orgánicos y volumen de agua requerida para alcanzar 30% de sólidos totales finales.....	78
Tabla 4. 3	Volumen de biogás producido por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1	Etapas de formación de metano	49
Figura 2. 2	Biodigestor Chino	50
Figura 2.3	Biodigestor Indio	51
Figura 2.4	Biodigestor Horizontal	52
Figura 2.5	Producción de biogás en países europeos, 2012.....	57
Figura 4.1	Diseño de biodigestor anaerobio para obtención de biogás.....	67
Figura 4. 2	Ubicación de la zona de muestreo, correspondiente al distrito de Chulucanas, provincia de Morropón	68
Figura 4. 3	Parcelas de criaderos de cerdos en Chulucanas	69
Figura 4.4	Recolección de estiércol de cerdo para la obtención de biogás en Chulucanas	70
Figura 4. 5	Recolección de residuos celulósicos para la obtención de biogás en Chulucanas.....	70
Figura 4. 6	<i>Peso de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos para la mezcla correspondiente.....</i>	<i>71</i>
Figura 4. 7	Mezcla de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas	71
Figura 4. 8	Peso de mezcla de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos para cálculo de sólidos totales.....	72
Figura 4. 9	Mezcla de agua de Cal al 2% con estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos para la pre-fermentación.....	75
Figura 4. 10	Biodigestores anaerobios y gasómetro para acumulación de biogás	76
Figura 4. 11	Volumen de biogás producido por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas	80
Figura 4. 12	Almacenamiento de biogás obtenido por fermentación de mezcla de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos.....	80
Figura 4. 13	Verificación de la capacidad combustible del biogás producido por fermentación de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos.....	81

Figura 4. 14	Capacitación a los pobladores sobre el proceso de obtención y usos de biogás.....	82
Figura 4. 15	Capacitación a los pobladores sobre el proceso de obtención y usos de biogás.....	82

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Determinación de la relación C:N (Rodríguez y Córdova, 2006)98
---------	--

RESUMEN

Las actividades agrícolas y pecuarias generan estiércol y residuos celulósicos que puede ser aprovechados para la producción de biogás, disminuyendo la generación de gases de efecto invernadero. El objetivo de la investigación fue evaluar la generación de biogás a partir de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos en Chulucanas. En diferentes parcelas se colectaron estiércoles de cerdo, vaca y residuos celulósicos. Se formuló la mezcla adecuada con una relación C25:N1 y 30 % de sólidos totales, se prefermentaron durante 4 días con agua de cal al 2 % a temperatura ambiente y luego la mezcla se fermentó anaeróbicamente en digestores de 20 L de capacidad durante 90 días, determinándose el volumen de biogás producido. La mezcla de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos produjo 232 l de biogás durante 90 días, con un porcentaje de metano de 65 %. Se demostró la producción de biogás y por ende la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por la digestión anaerobia de estiércol de animales y residuos celulósicos.

Palabras clave: Biogás, estiércol, residuos celulósicos, metano

ABSTRACT

Agricultural and livestock activities generate manure and cellulosic waste that can be used to produce biogas, decreasing the generation of greenhouse gases. The objective of the research was to evaluate the generation of biogas from cow, pig and cellulosic manure in Chulucanas. In different plots pig, cow and cellulosic residues were collected. The appropriate mixture was formulated with a ratio C25:N1 and 30% of the total solids were folded for 4 days with 2% lime water at room temperature and then the mixture was fermented anaerobically in 20 l of digester capacity for 90 days, determining the volume of biogas produced. The mixture of pork, cow and cellulosic waste produced 232 l of biogas for 90 days, with a methane percentage of 65%. Biogas production was demonstrated, and greenhouse gas emissions have therefore been reduced through anaerobic digestion of animal manure and cellulosic residues.

Keywords: Biogas, manure, cellulosic residue, methane

INTRODUCCIÓN

El deterioro del ambiente ocurre directamente por diversos factores antropogénicos que afectan el agua, suelo, flora y fauna. La actividad agropecuaria origina la contaminación los recursos naturales, por ende la importancia de revertir sus efectos, haciendo uso de nuevas técnicas de reutilización y tratamientos de los residuos que genera, con el fin de buscar nuevas alternativas que vayan en beneficio del ser humano y del ambiente.

El tratamiento del estiércol de ganado bovino y porcino, por medio de biodigestores se presenta como una alternativa de transformación, depuración y utilización de dichos residuos, minimización de sus efectos negativos sobre el cambio climático y la generación de valor agregado a dicha actividad, con la consiguiente mejora de la calidad ambiental.

El manejo adecuado de residuos rurales -residuos de animales y vegetales (biomasa)- producidos por la actividad agropecuaria puede contribuir significativamente a la producción de distintas formas de energía. La digestión anaeróbica de la biomasa, producto de una serie de reacciones bioquímicas, genera biogás, el cual, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), el que es usado como combustible de un generador de corriente para producir electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos rurales, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir biogás como energía.

Bajo este contexto, el presente trabajo de investigación pretende proponer el tratamiento de estos residuos sólidos en beneficio de la comunidad mediante la producción de biogás en la ciudad de Chulucanas como una alternativa de solución ante el incremento de la acumulación de residuos orgánicos producto de la actividad agropecuaria y con ello reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

CAPITULO I

ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El metano es uno de los gases constituyentes del inventario mundial con efecto invernadero (GEI) a los cuales se atribuye en gran medida el cambio climático observado en nuestro planeta. Las principales fuentes de metano a nivel mundial son: la ganadería, el cultivo del arroz, las minas de carbón, los rellenos sanitarios, la quema de biomasa, las fuentes de suministro de combustibles fósiles y el venteo en las plantas procesadoras de hidrocarburos. Los proyectos de captura de metano y su conversión a electricidad, son idóneos para tales mecanismos. El metano representa un poco más del 50% de los gases que constituyen el biogás, lo que hace a éste un combustible con buenas características para ser usado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos. **(Arvizu & Huacuz, 2003).**

Chulucanas es un distrito netamente agrícola, perteneciente a la provincia de Morropón, región Piura cuyos cultivos predominantes son el plátano, mango, limón, cacao etc. Los pobladores dedicados a esta actividad obtienen ingresos económicos suficientes para su sustento familiar por lo que la producción agrícola es de gran importancia para los productores de la zona. Todo esto trae consigo una gran cantidad de residuos orgánicos, que al no

tener un buen manejo tienden a acumularse en las parcelas sin ser aprovechados. Los productores convencionales muchas veces queman sus residuos generados por dicha actividad generando emisiones de gases (GEI). En cambio, las asociaciones de productores de cultivos orgánicos a diferencia de los agricultores convencionales, evitan la incineración de residuos, lo que da lugar a su acumulación y es aquí donde se plantea esta investigación con el fin de aprovechar dichos residuos orgánicos tratándolos adecuadamente para producir biogás, a partir de ellos y agregándoles estiércol de ganado vacuno y porcino que producen las actividades agropecuarias que se realizan en estos centros poblados, como alternativa de solución a este problema ambiental, al eliminar dichas fuentes de contaminación; la quema indiscriminada de residuos orgánicos por parte de los agricultores convencionales y las emisiones de GEI originadas por la biodegradación de la biomasa de residuos acumulados sobre todo por parte de las asociaciones de productores de cultivos orgánicos.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Las actividades agrícolas y agropecuarias desarrolladas por los pobladores del distrito de Chulucanas producen gran acumulación de residuos orgánicos que constituyen fuentes de contaminación y generan emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente?

1.3. HIPÓTESIS

La generación de biogás producido a partir de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos en el distrito de Chulucanas, minimizará la biomasa de residuos orgánicos disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La producción de biogás es una buena alternativa para tratar de minimizar y utilizar los residuos orgánicos. Esta energía es generada por un biodigestor o bioreactor que posteriormente será aprovechada como una contribución al cuidado del ambiente utilizando este tipo de energía renovable, además puede ser utilizada de diferentes formas: en la generación de calor, electricidad, como combustible, etc. Asimismo, el estiércol de los animales como el ganado porcino y vacuno hace que la producción de biogás sea más eficiente y al ser utilizado reducirá las emisiones de gases al ambiente.

El cambio climático por efecto de los gases de efecto invernadero origina una problemática medioambiental con graves consecuencias sobre sus efectos y el deterioro de ecosistemas poniendo en riesgo la calidad ambiental perjudicando la salud y la vida de todos. Las actividades agrícolas y agropecuarias generan gran cantidad de residuos orgánicos que de no ser tratados adecuadamente en su biodegradación originan gases de efecto invernadero, lo que constituye en sí un problema, el mismo que es necesario estudiar y plantear alternativas de solución.

Es pues, el distrito de Chulucanas una zona en la que predominan las

actividades agrícolas y agropecuarias lo que produce una buena cantidad de residuos orgánicos que, al no darles un manejo adecuado genera un problema ambiental. Al incentivar el manejo adecuado de estos residuos agroindustriales y obtener un beneficio a la comunidad y medio ambiente a través de la generación de biogás, crea condiciones para su masificación acordes con el desarrollo sostenible actual.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

- ✓ Evaluar la generación de biogás a partir de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos en Chulucanas, Piura.

1.5.2. Objetivos Específicos

- ✓ Determinar el tiempo máximo de producción de biogás.
- ✓ Evaluar la calidad de biogás.
- ✓ Plantear los usos potenciales del biogás por parte de los pobladores del distrito de Chulucanas.

1.6. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se plantea como la formulación de un tratamiento de los residuos orgánicos agropecuarios producidos en la localidad de Chulucanas Piura, la parte experimental se realizará en una

parcela ubicada a la entrada de Chulucanas a la altura del puente Ñacara
carretera a Chulucanas, Km 50.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como el estiércol y los residuos orgánicos. La composición química del biogás indica que el componente de mayor porcentaje es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero (dañino para el medio ambiente). La mezcla de CH_4 con el aire puede funcionar como combustible y arde con llama azul, dando una combustión completa (Cepero, et al., 2012).

La producción de biogás ha ido en aumento en las últimas décadas revelando su importancia para el medio ambiente, para ello; las investigaciones se centran en aumentar la productividad y rendimiento, para tal fin se manejan varios parámetros como son la temperatura, materia prima, relación carbono nitrógeno, etc.

Dentro de los residuos celulósicos usados para la fermentación, Vargas citado por **Steiner (2006)** indica la capacidad del banano verde para la producción de biogás y concluye que el banano verde es un buen sustrato, y que la concentración de nutrientes y el pretratamiento no tenían efectos significativos en el comportamiento de la producción de biogás, pero el empleo de la fruta

ya sea el banano entero o sólo la pulpa, influye significativamente en el rendimiento. Las condiciones necesarias son: temperatura mayor a 33 °C y concentración de sólidos igual a 0.2 %. Se obtuvo un rendimiento de 0.18 +/- 0.08 m³ biogás/kg ST en un biodigestor de laboratorio.

En otras investigaciones como lo presentado por **Castillo y Tito (2011)**, quienes emplearon dos mezclas de sustratos; una formada por excremento de cuy, rastrojo del alimento vegetal de cuy y agua; y la segunda por excremento de cuy, rastrojo del alimento vegetal del cuy, residuo de grass y agua. Los sustratos de la mezcla uno después que fueron acondicionados fueron mezclados con agua y agregados al prefermentador constituido por un depósito cilíndrico de polietileno de 230 litros de capacidad. Posteriormente se agregó un volumen de 30 litros de excremento de cuy, 60 litros de rastrojo del alimento vegetal del cuy y 30 litros de agua de caño. La mezcla dos se prefermentó por separado en forma similar a la mezcla uno con la sola diferencia que el rastrojo de la comida vegetal del cuy soleado y el residuo de grass soleado fueron mezclados previamente en proporciones iguales para constituir un solo sustrato antes de ser agregados al prefermentador, de tal modo que este sustrato mezcla y el excremento de cuy constituyeron los dos materiales que se trabajó para la prefermentación como si hubieran sido los sustratos de la mezcla uno. El volumen total de biogás producido en el biodigestor uno fue de 104 litros en un tiempo de fermentación de 7 meses y 6 días; y en el biodigestor dos de 452 litros en un tiempo de fermentación de 7 meses y 19 días.

Asimismo, **Torres et al. (2014)** emplearon reactores que simularon a un biodigestor del tipo batch con 3 tratamientos. Para los tres tratamientos usaron estiércol de vacuno. La variación entre los tres tratamientos consistió que en el tratamiento previo a utilizar el Tratamiento 1, se colocó el sustrato a los

biodigestores sin tratamiento previo, el Tratamiento 2 se realizó un precompostaje al sustrato antes de colocar a los biodigestores, y el Tratamiento 3: se realizó un abono bokashi como tratamiento previo antes de su colocación a los biodigestores, con la variante que este abono se ha desarrollado con microorganismos benéficos los cuales actúan sobre el sustrato haciendo que el tratamiento sea más eficiente en menor tiempo. Esta investigación tenía como objetivo comparar entre los tres tratamientos la calidad y cantidad de biogás y la calidad de biol. Para la composición de biogás se obtuvo un promedio de CH₄ de 50,7 % para el Tratamiento 1, un promedio de 52.6 % para el Tratamiento 2, y un promedio de 50.9 % para el Tratamiento 3. La mayor producción de biogás se obtuvo en el Tratamiento 3 (0.2m³/Kg SV), en comparación con el Tratamiento 2 (0.15 m³/Kg SV) y con el Tratamiento 1 (0.1 m³/Kg SV).

En otras investigaciones como lo reportado por **López et al. (2014)** llevaron a cabo la digestión anaerobia de residuos orgánicos para la producción de biogás en tres reactores con volumen de 4,2 l y volumen de trabajo de 2,0 l. La digestión se llevó a cabo sin agitación y a temperatura ambiente. Dos digestores (D1 y D2) fueron alimentados con 9 g/l de diversos residuos de frutas y verduras, el tercer digestor (D3) fue alimentado solamente con cáscara y pulpa de plátano. El monitoreo de producción diaria de biogás se realizó durante 217 días; al finalizar este proceso se obtuvo una producción promedio de 497 y 477 ml para D1 y D2 respectivamente, en el caso de D3 se obtuvo 520 ml. Se realizó la detección de ácidos orgánicos por HPLC y se detectó una concentración promedio de 3,55 y 4,55 g/L de ácido acético en D1 y D2 respectivamente y 7,36 g/l para el D3, también se midió, ácido propiónico, butírico, succínico y láctico. Se midió la producción de metano

obteniéndose un máximo de 0,806, 0,688 y 0,136 mol CH₄/gSV/h para los digestores D1, D2 y D3 respectivamente.

Otras metodologías dirigidas al aprovechamiento de las potencialidades energéticas con la tecnología del biogás trazaron como objetivo determinar el potencial de los residuos sólidos orgánicos del proceso productivo de arroz como sustrato y biol residual de la planta de tratamiento de aguas residuales como inóculo, para ser utilizados en el proceso de fermentación anaeróbica. Esta investigación comprendió, en primer orden el desarrollo de un diagnóstico de la producción de arroz, la generación de residuales del proceso productivo, las potencialidades para su tratamiento mediante la digestión anaerobia, la producción de surtidos de alto valor agregado como el biogás con fines energéticos y biofertilizantes, para el tratamiento de los suelos. Posteriormente se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuales del arroz y el diseño de un reactor de mezcla completa con agitación continua y recirculación de 20 m³ usando la mezcla de paja de arroz, cáscara y otros residuos del proceso de secado del arroz (cascarillas y polvo) como sustrato y un biol residual efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales como inóculo. Esta metodología permitió aseverar en primera instancia su validez para la remoción de residuales y mitigar sus efectos medio ambientales, asimismo, generar subproductos de alto valor agregado, como el biogás con fines energéticos y el biol residual efluente como biofertilizante de la tierra cultivable en las tierras cultivables. **(Díaz, et al., 2016).**

2.2. MARCO LEGAL

2.2.1. Marco Legal Nacional

- ✓ La Constitución Política del Perú, promulgada en 1993, de acuerdo con el artículo 2 numeral 22, establece que *“toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”*. Así mismo, en su artículo 67 establece que el *Estado determina la política nacional del ambiente y promueve el uso sostenible de los recursos naturales*.
- ✓ Ley General de Salud N° 26842 del 20 de julio de 1997, en la cual se reconoce la responsabilidad del Estado frente a la protección de la salud ambiental. En su Artículo 96 del Capítulo IV, se menciona que en la disposición de sustancias y productos peligrosos deben tomarse todas las medidas y precauciones necesarias para prevenir daños a la salud humana o al ambiente. Así mismo, los Artículos 99, 104 y 107 del Capítulo VIII, tratan sobre los desechos y la responsabilidad de las personas naturales o jurídicas de no efectuar descargas de residuos o sustancias contaminantes al agua, el aire o al suelo.
- ✓ Ley General de Residuos Sólidos N° 27314 del 21 de julio de 2000 y su modificatoria Decreto Legislativo N° 1065, establece en su artículo 5, incisos 4 y 5, dentro de las competencias del Ministerio del Ambiente: *“Incluir en el Informe Nacional sobre el Estado del Ambiente en el Perú, el análisis referido a la gestión y el manejo de los residuos sólidos, así como indicadores de seguimiento respecto de sus gestión”* e *“Incorporar en el Sistema Nacional de Información Ambiental, información referida a la gestión y manejo de los residuos sólidos”*. Asimismo, en el artículo 7° se establece que *“el Ministerio de Salud es competente, para normar*

los aspectos técnicos - sanitarios del manejo de residuos sólidos, incluyendo los correspondientes a las actividades de reciclaje, reutilización y recuperación”.

- ✓ Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos N° 27314, aprobada mediante Decreto Supremo N° 057-04-PCM, que de acuerdo con su artículo 6 establece que *“la autoridad de salud de nivel nacional para los aspectos de gestión de residuos previstos en la Ley es la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud y en el nivel regional, son las Direcciones de Salud (DISA) o las Direcciones Regionales de Salud, según corresponda”.*
- ✓ Ley N° 28611 Ley General del Ambiente del 13 de junio de 2005, en su artículo N° 1 menciona que *“Toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes”.* Así mismo, en el artículo 67 menciona que: *“Las autoridades de nivel nacional, sectorial, regional y local priorizan medidas de saneamiento básico que incluyan la disposición de excretas y de los residuos sólidos en las zonas urbanas y rurales, promoviendo la universalidad, calidad y continuidad de los servicios de saneamiento”.* A su vez, el artículo 119 en su inciso 1 menciona que *“La gestión de los residuos sólidos de origen doméstico, comercial o que siendo de origen distinto presenten características similares a aquellos, son de responsabilidad de los gobiernos locales”.*
- ✓ Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental del 20 de abril de 2011, en su artículo 5, inciso b, establece que para los efectos de la clasificación de los proyectos de inversión

que queden comprendidos dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, la autoridad competente deberá ceñirse, entre otros, al criterio de “la protección de la calidad ambiental, tanto del aire, del agua, del suelo, como la incidencia que puedan producir el ruido y los residuos sólidos y líquidos”.

2.2.2. Marco Legal Municipal

- ✓ Ley N° 27972 Ley Orgánica de Municipalidades, en su artículo 80, inciso 3 y 3.1, indica que es una función exclusiva de las municipalidades distritales “Proveer el servicio de limpieza pública, determinando las áreas de acumulación de desechos, rellenos sanitarios” y en el inciso 1 y 1.1. establece como una función exclusiva de las municipalidades provinciales “Regular y controlar el proceso de disposición final de desechos sólidos, líquidos y vertimientos industriales en el ámbito provincial”.
- ✓ Ley N° 28245, Ley marco del Sistema de Gestión Integral y su Reglamento DS N° 008-2005 PCM, en la que se establece que el Sistema Nacional de Gestión Ambiental tiene por finalidad orientar, integrar, coordinar, supervisar, evaluar y garantizar la aplicación de las políticas, planes, programas y acciones destinados a la protección del ambiente así como contribuir a la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. Residuos orgánicos biodegradables

La Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, en su artículo 14, define a los residuos sólidos como aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido, de los que su generador dispone, o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional o de los riesgos que causan a la salud y el ambiente, para ser manejados a través de un sistema que incluya según corresponda las siguientes operaciones o procesos: minimización de residuos, segregación en la fuente, reaprovechamiento, transferencia y disposición final. Para los efectos de esta ley (artículo 15) y su reglamento, los residuos sólidos se clasifican según su origen en: domiciliario, comercial, limpieza de espacios públicos, establecimiento de atención de salud, industria, actividades de construcción, agropecuario y de instalaciones o actividades especiales **(Carreño, 2012)**.

Los residuos sólidos son definidos como aquellos desperdicios que no son transportados por el agua y que han sido rechazados porque ya no serán utilizados. En el caso de los residuos sólidos municipales, a los residuos de alimentos putrescibles (biodegradables) se les llama basura y a los residuos no putrescibles se les designa como desechos. Los desechos incluyen diversos materiales que pueden ser combustibles (papel, plástico, textiles) o no combustibles (vidrio, metal, mampostería). En los residuos municipales no se incluyen sólidos que normalmente no constituyen responsabilidad municipal como cenizas de plantas generadoras de electricidad alimentadas con carbón, plantas para el tratamiento de aguas municipales, residuos de predios de crianza de animales y desechos de minas. A su vez, el término

“residuos urbanos” agrupa los residuos generados por cualquier actividad en los núcleos de población y sus zonas de influencia. Incluye los residuos domiciliarios, comerciales y de servicios, sanitarios, limpieza diaria, zonas verdes y recreativas, animales muertos abandonos, enseres, residuos industriales de construcción, agrícolas y ganaderos. Asimismo, separa los distintos componentes en tres grupos: inertes (metales, vidrio), fermentables (materia orgánica putrescible) y combustibles como plásticos, madera **(Carreño, 2012).**

Los residuos agroindustriales comprenden un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos generales: residuos de frutas o plantas y residuos provenientes de animales (estiércoles y purines). Asimismo, los desechos generados por el sector primario comprenden los residuos agrícolas, ganaderos y forestales; los desechos generados por el sector secundario incluyen los residuos industriales (agroalimentarios, textiles, curtiembres, residuos del papel, etc.) y finalmente se encuentran los residuos producidos por el sector terciario de servicios dentro de los que se tienen dos grandes afluentes como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales domésticas.**(Cendales, 2011)**

Asimismo, los residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. Ejemplo: los restos de comida, frutas y verduras, carne, huevos, etcétera, o pueden tener un tiempo de degradación más lento, como el cartón y el papel. Se exceptúa de estas propiedades al plástico, porque a pesar de tener su origen en un compuesto orgánico, posee una estructura molecular más complicada y son muy

recalcitrantes.

Existen muchas formas de clasificación de los residuos sólidos orgánicos, sin embargo, las dos más conocidas están relacionadas con su fuente de generación y con su naturaleza y/o características físicas.

A. Según su fuente de generación: Los residuos sólidos orgánicos se clasifican en:

i. Residuos sólidos orgánicos provenientes del barrido de las calles:

Se considera dentro de esta fuente a los residuos acumulados también en las papeleras públicas; con contenido variado, encontrándose restos de frutas, papeles y plásticos. En este caso, sus posibilidades de aprovechamiento son un poco más limitadas, por la dificultad que representa llevar adelante el proceso de separación física.

ii. Residuos sólidos orgánicos institucionales:

Son residuos provenientes de instituciones públicas (gubernamentales) y privadas. Se caracteriza mayormente por contener papeles, cartones y también residuos de alimentos provenientes de los comedores institucionales.

iii. Residuos sólidos de mercados:

Son aquellos residuos provenientes de mercados de abastos y otros centros de venta de productos alimenticios. Es una buena

fuelle para el aprovechamiento de orgánicos y en especial para la elaboración de compost y fertilizante orgánico.

iv. Residuos sólidos orgánicos de origen comercial:

Son residuos provenientes de los establecimientos comerciales, entre los que se incluyen tiendas y restaurantes. Estos últimos son la fuente con mayor generación de residuos orgánicos debido al tipo de servicio que ofrecen como es la venta de comidas. Requieren de un trato especial por ser fuente aprovechable para la alimentación de ganado porcino (previo tratamiento).

v. Residuos sólidos orgánicos domiciliarios:

Son residuos provenientes de hogares, cuya característica puede ser variada, pero que mayormente contienen restos de verduras, frutas, residuos de alimentos preparados, podas de jardín y papeles. Representa un gran potencial para su aprovechamiento en los departamentos del país.

B. Según su naturaleza y/o característica física:

Los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza y/o característica fuente se clasifican en:

i. Residuos de alimentos:

Son restos de alimentos que provienen de diversas fuentes, entre ellas: restaurantes, comedores, hogares y otros establecimientos de expendio de alimentos.

ii. Estiércol:

Son residuos fecales de animales (ganado) que se aprovechan para su transformación en bio-abono o para la generación de biogás.

iii. Restos vegetales:

Son residuos provenientes de podas o deshierbe de jardines, parques u otras áreas verdes; también se consideran algunos residuos de cocina que no han sido sometidos a procesos de cocción como legumbres, cáscara de frutas, etc.

iv. Papel y cartón:

Son residuos con un gran potencial para su reciclaje pero que no materia de desarrollo en este trabajo.

v. Cuero:

Son residuos mayormente derivados de artículos de cuero en desuso (**Jaramillo, G. y Zapata, L. 2008**).

2.3.2. Residuos Agropecuarios

Podemos definir como residuos agropecuarios aquellos generados en las actividades agrarias y ganaderas. Estos residuos son utilizados habitualmente en las explotaciones donde se generan, y en la mayoría de los casos tienen una vocación de materia prima, con fines de abonado o con destino a la alimentación animal. Asimismo, dentro de los residuos podemos

encontrar los residuos peligrosos como envases de fertilizantes, plaguicidas, agroquímicos.

2.3.2.1. Estiércol

El estiércol es un residuo formado por las excreciones sólidas y líquidas del ganado, mezcladas con los materiales celulósicos. El conjunto constituye un producto que empieza a descomponerse paulatinamente. De acuerdo con el estado de descomposición que presentan sus constituyentes, suelen considerarse los siguientes tipos:

A. Estiércol fresco

Es un residuo en que la fermentación no ha hecho más que empezar y aún pueden identificarse en él las excreciones.

B. Estiércol semi-hecho

Presentan un estado intermedio de descomposición y, aunque aún es posible distinguir sus componentes, ya se encuentra porciones en que esta identificación no puede hacerse con facilidad.

C. Estiércol maduro

Muy fermentado; los restos no puede identificarse debido a que se han descompuesto totalmente.

La materia prima para la producción de biogás y fertilizante es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga

duración de descomposición (como vísceras).

El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo, sin embargo; el fertilizante que producen es muy ácido, debido a esto, previo a ingresar al biodigestor se debe realizar un tratamiento a este para que el biol que salga no sea un fermento, sino un fertilizante que sirva para el suelo.

2.3.2.2. Estiércol de cerdo

El estiércol de cerdo es un buen fertilizante de plantas, el alimento con alto contenido hídrico que se da al cerdo hace que su estiércol tenga una cantidad de agua abundante, clasificándosele entre los abonos frescos. Así, al ser alimentados con granos, papas, restos de maleza, sobras de la cocina, etc., hace que su estiércol sea muy bueno para procesos de degradación anaerobia con producción de gas. El estiércol de cerdo frecuentemente contiene altas concentraciones de Cu y Zn a diferencia de las heces de otras especies, debido a que el Cu se adiciona a las raciones, con el fin de aumentar las ganancias de peso y la conversión alimentaria de cerdos de engorde, mientras que el Zn se utiliza para contrarrestar el potencial de toxicidad del Cu, sin embargo; la presencia de estos dos minerales es beneficioso para su uso como abono en los cultivos **(García, 2000 y Yauyo, 2016)**.

Para **Salazar (2004)** la tasa de producción de excretas puede ser afectada por varios factores, señalándose:

- Edad del animal
- Madurez fisiológica
- Cantidad y calidad del alimento ingerido
- Volumen de agua consumida
- Clima.

2.3.2.3. Estiércol de ganado vacuno

Es el producto que se obtiene de la fermentación anaeróbica sucedida en el intestino de los residuos alimentarios no utilizados por los rumiantes. Esta fermentación sintetiza una considerable cantidad de proteína que es desperdiciada, junto con parte de la energía no aprovechada. El crecimiento microbiano en el estiércol de ganado vacuno se encuentra limitado por la poca cantidad de carbohidratos que se encuentran disponibles. El estiércol de ganado vacuno varía en su composición según las especies de las que procedan, la forma en que se conserven y la alimentación que se proporciona **(Cárdenas, 2012)**. La tabla 2.1 indica la composición química de este estiércol.

Tabla 2. 1 Composición química del estiércol de ganado vacuno

Componente	Porcentaje (%)
<i>Agua</i>	15.7
<i>Sustancia orgánica seca</i>	60.3
<i>pH</i>	7.6
<i>Nitrógeno total</i>	2.7
<i>Fosforo</i>	1.6
<i>Potasio</i>	2.8
<i>Calcio</i>	3.5
<i>Magnesio</i>	2.3
<i>Sodio</i>	0.3
<i>Azufre</i>	0.3

Fuente: Cárdenas, 2012

2.3.3. Fermentación anaerobia

La fermentación anaerobia es un proceso microbiano en ausencia de oxígeno que produce una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una solución acuosa que contiene los microorganismos responsables del proceso fermentativo. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales.

El biogás es considerado el producto principal de la digestión anaerobia, el cual contiene una mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de

carbono (30 a 50 %), con pequeñas cantidades de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso fermentativo. La cantidad de gas producido varía de acuerdo con muchos factores, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70 %. A pesar de que su potencia calorífica no es muy grande, puede sustituir con ventaja al gas de ciudad, utilizándose en aplicaciones tan diversas como: fuente de calor (cocina, alumbrado), combustión en calderas de vapor para calefacción y combustible de motores acoplados a generadores eléctricos. Asimismo, la masa restante biodegrada por las bacterias puede utilizarse como abono para la fertilización de suelos. **(Acosta, Y. y Obaya, M 2005)**

2.3.3.1. Factores físicos y químicos

Todos los procesos biológicos requieren de factores externos a fin de llevar a cabo sus reacciones químicas, así la digestión anaerobia se efectuará satisfactoriamente o no dependiendo de las condiciones que estén presentes en el medio. Para llevar a cabo el adecuado desarrollo de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica presente en los residuos que son sometidos a esta biodegradación, es importante conocer en qué medida contribuyen o no a esta biodegradación. Diferentes parámetros físicos y químicos siempre están presentes en los procesos anaerobios; siendo los principales factores que influyen en el proceso, los siguientes:

- ✓ Composición residual.
- ✓ Someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de retención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con las condiciones de digestor empleado.
- ✓ Respecto a la temperatura no someterlo a cambios bruscos encontrándose en un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C.
- ✓ Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6.6 y 7.6 que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.
- ✓ Contenido en sólidos: se recomienda alrededor de 10 % de sólidos totales de acuerdo con el tipo de fermentación, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- ✓ Nutrientes: las cuales sirven como sustrato para la fermentación, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- ✓ Existencia de cantidades de N y P en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono.
- ✓ Tóxicos: No existencia, en el residuo a ser digerido, de cantidades elevadas de compuestos que pueden transformarse en tóxicos durante el proceso como N ($\text{NH}_4 + \text{NH}_3$), S (S_2). El oxígeno, inhibe la digestión en concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas, además de metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos.

- ✓ No ocurrencia de sobrecargas orgánicas o tóxicas además del límite soportable por el proceso. **(Acosta, Y. y Obaya, M. 2005)**

2.3.4. Fundamentos de la fermentación metanogénica

La Metanogénesis es el proceso anaerobio en el que los equivalentes de electrón de la materia orgánica se utilizan para reducir el carbono a metano, CH₄ (estado de oxidación -4). La metanogénesis también denominada síntesis del metano puede ser biogénica y abiogénica. Anualmente se forman 349 - 820 x 10¹² g de metano, de los que 81- 86 % son de origen biogénico (rumiantes, zonas encharcadas, humedales naturales, termes, vertederos, océanos y lagos, tundras) y 13 – 19 % de origen abiogénico (minería de carbón, escapes industriales y de gaseoductos, combustión de biomasa, emisiones de gas natural, hidratos de metano, volcanes, automóviles) **(Carreño, 2012)**.

El metano es el gas orgánico más abundante en la atmósfera. En la actualidad la tasa de CO₂ atmosférico y CH₄ es aproximadamente 27:1; sin embargo, el metano absorbe más efectivamente radiación en la región infrarroja de 4 – 100 nm, considerándose un gas con efecto invernadero que tiene un potencial de calentamiento 21 – 25 veces mayor que el dióxido de carbono. Su vida media en la atmósfera es 12 años y es muy poco soluble en agua (28 mg/l - 1), además del riesgo latente por su límite de explosividad, entre 5 – 15 en aire; razones por las que debe ser utilizado como fuente calorífica o de lo contrario en bioprocesos como la obtención de biomasa con bacterias metanótrofas.

2.3.4.1. Metanogénesis biogénica

Es la formación del metano como parte del biogás o gas que se desprende de ambientes anaerobios ricos en materia orgánica, principalmente zonas pantanosas y eructos de los rumiantes. El biogás se produce mediante el proceso metabólico de descomposición anaerobia de la materia orgánica en metano (40 - 70 %), dióxido de carbono (30 - 60 %), sulfuro de hidrógeno (0 - 3 %), amoníaco (0 - 2 %), hidrógeno molecular (0 - 1 %) y trazas de nitrógeno, monóxido de carbono y vapor de agua.
(Barreto, G. y Cordova, J. 2012)

El metano es el resultado de la actividad de un grupo muy especializado de bacterias que convierten los productos de fermentación de otros microorganismos anaerobios (especialmente dióxido de carbono, hidrógeno molecular, formiato y acetato) en metano y dióxido de carbono. Se considera que las bacterias son las únicas responsables de las transformaciones que conducen a la metanogénesis, aunque en ocasiones se puede detectar una variedad de distintos protozoos anaerobios (en el rumen los protozoos constituyen el 50 % de la biomasa total).

2.3.4.2. Características de las bacterias metanogénicas

- ✓ Archeobacterias.
- ✓ Forma diversa, Gram positivas y Gram negativas.
- ✓ Anaerobios estrictos, muy sensibles al oxígeno y agentes oxidantes como el nitrato.
- ✓ Carecen de catalasa y superóxido dismutasa.

- ✓ Cuando crecen en forma autotrófica, el dióxido de carbono es la principal fuente de carbono y lo asimilan mediante la vía reductiva del Acetil-CoA que conduce a la formación de acetato, a partir del cual sintetizan las sustancias celulares.; sin embargo, el crecimiento de todas ellas es estimulado por el acetato y en algunas especies por ciertos aminoácidos.
- ✓ Utilizan el amoníaco como fuente de nitrógeno.
- ✓ El hierro, níquel y cobalto son oligoelementos requeridos para su crecimiento, así como también el metal traza níquel que es un componente del Factor 430 (coenzima) y de la enzima hidrogenasa y monóxido de carbono deshidrogenasa (CODH).
- ✓ Se encuentran en estrecha relación con las bacterias productoras de hidrógeno estableciendo una sintrofia (simbiosis mutualista entre bacterias productoras de hidrógeno, acetogénicas obligadas y metanogénicas). **(Carreño, 2012).**

2.3.4.3. Sustratos para la metanogénesis

Se conocen tres clases de sustratos utilizados para la metanogénesis:

a) Sustratos tipo CO₂ (bacterias hidrogenotróficas)

- ✓ CO₂
- ✓ Formiato HCOO⁻
- ✓ Monóxido de carbono

En esta primera clase de sustratos, los electrones necesarios para la metanogénesis derivan generalmente del H_2 . Los metanógenos que crecen sobre H_2 y CO_2 son autotróficos y el CO_2 sirve tanto como fuente de carbono como de aceptor final de electrones. Por esta última condición, el proceso se considera una respiración anaerobia de sustrato inorgánico (Reducción del CO_2).

b) Sustratos de metilo (bacterias metilotróficas)

- ✓ Metanol
- ✓ Metilamina
- ✓ Dimetilamina
- ✓ Trimetilamina
- ✓ Metilmercaptano
- ✓ Dimetilsulfuro

En los sustratos tipo metanol las moléculas orgánicas son reducidas por el hidrógeno como fuente externa de electrones. Alternativamente, en ausencia de hidrógeno, una pequeña cantidad de metanol es oxidado hasta dióxido de carbono para generar los electrones necesarios y reducir las moléculas de metanol hasta metano, es decir, el grupo metilo se reduce a metano. a través de reacciones en donde algunas moléculas del sustrato funcionan como donadores de electrones y se oxidan a dióxido de carbono, mientras que otras se reducen y por lo tanto son aceptores de electrones (Respiración anaerobia de sustrato inorgánico y orgánico, respectivamente).

c) Sustratos de acetotróficos (bacterias acetotróficas)

En esta tercera clase de sustratos para la metanogénesis, el ácido acético se escinde (reacción acetoclástica o escisión del acetato a CH_4 mas CO_2), para formar metano a partir del grupo metilo y dióxido de carbono a partir del grupo carboxilo, en una reacción de fermentación.

2.3.4.4. Parámetros de operación de la Metanogénesis

Los parámetros de operación son aquellos que se fijan en la parte inicial del proceso, señalando las condiciones en las cuales va a trabajar el sistema. Esto incluye el tipo de sustrato, relación carbono: nitrógeno, contenido de sólidos totales, acidez, pH entre otros.

a. Tipo de sustrato y contenido de materia orgánica

Los sustratos que generalmente se usan para la metanogénesis pueden clasificarse como líquidos o sólidos como los residuos del procesamiento industrial y de alimentos: industria cervecera, residuos de vegetales e industria conservera, suero de la producción de queso, residuos de mataderos. Asimismo, estiércol animal y biomasa agrícola (principalmente de no rumiantes como cerdos) y sedimentos de aguas residuales **(Barreto, G. y Córdova, J. 2012)**.

Los desperdicios frescos (pastos verdes, rastrojos) deben dejarse al aire libre aproximadamente 10 días para su descomposición antes de ser introducidos al digestor. Las pajas y granos de cereales generan más gas que el estiércol fresco, pero el contenido de metano es menor. Las excretas humanas generan más gas y mayor cantidad de metano

que el estiércol fresco de vacuno y pueden utilizarse solas o complementadas con otros tipos de desechos.

El sustrato utilizado debe contener una alta demanda biológica de oxígeno (DBO) (1,2 – 2 g/L) y además ser rico en nitrógeno que provea una óptima capacidad tamponante para evitar el descenso del pH a menos de 6,2. Una relación $DBO/DQO = 0,5$ denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad; $DBO/DQO =$ menor de 0,5 presencia de sustancias tóxicas que retardan o inhiben la biodegradabilidad; $DBO/DQO =$ mayor de 0,5 es un vertido orgánico y $DBO/DQO =$ menor de 0,2 es considerado un vertido inorgánico **(Carreño, 2012)**.

b. Relación C:N

Algunos autores recomiendan una relación C:N de 30:1, porque el carbono es consumido 25 – 35 veces más rápidamente que el nitrógeno **(Varnero, 2011)**. Una buena mezcla está compuesta por estiércol de ave con paja de arroz o rastrojos con excretas. Una relación C:N muy alta provee exceso de carbono, originando acumulación de ácidos volátiles, disminución de pH a extremos no permisibles para las bacterias metanogénicas y cese de la producción de biogás. Por el contrario, con una relación C:N menor a 30:1, el nitrógeno se acumula en forma de amoníaco hasta concentraciones que afectan negativamente las bacterias metanógenas **(Cueva, 2012)**.

c. Sólidos totales

El contenido de sólidos totales debe estar entre 7 – 9 % para procesos semicontinuos o continuos. En procesos discontinuos la mezcla no

requiere fluidez y se recomienda trabajar con diluciones de 25 – 35 % de sólidos totales. Los sólidos totales se ajustan con adición de agua. Un contenido bajo de sólidos totales es 10 % e implica 90 % de humedad. Se considera 15 – 20 % un contenido medio y 21 – 40 % un contenido alto de sólidos totales **(Varnero, 2011)**.

d. Acidez y pH

El contenido de ácidos debe estar en el rango de 2 000 – 4 000 mg/L, al mismo tiempo que se mantiene el pH entre 6,6 – 7,6. La concentración de ácidos orgánicos y el pH del contenido del digestor, deberán determinarse frecuentemente a fin de asegurar que el funcionamiento del sistema anaerobio permanezca en equilibrio. Si la capacidad de regulación se agota, se debe añadir una base química (carbonato o similar), para evitar una caída del pH, que destruiría a las bacterias metanógenas **(Acuña, A. y León, P. 1998)**.

La concentración de ácidos orgánicos es un indicador del funcionamiento del sistema. Los ácidos orgánicos clave son los de cadena corta que varían en longitud de cadena, desde un carbono hasta ocho carbonos por mol (fórmico, acético, propiónico, butírico isobutírico, valérico, isovalérico, caproico, heptanoico, octanoico). Estos ácidos son denominados volátiles debido a que en su forma no ionizada pueden destilar con agua a ebullición. Este significado del término volátil es diferente del significado de compuestos orgánicos volátiles (COV), término usado para describir compuestos orgánicos que son fácilmente eliminados del agua mediante separación con aire.

Los ácidos grasos de cadena corta no pueden eliminarse del agua mediante separación con aire.

Los ácidos volátiles que se encuentran presentes a mayores concentraciones durante el arranque de un sistema anaerobio son el acético, propiónico, butírico e isobutírico. También se forman como productos intermediarios de la degradación de residuos orgánicos otros ácidos no volátiles como el láctico, pirúvico y succínico, pero sus concentraciones son mucho menores que las de los ácidos volátiles.

e. Temperatura

Se considera la metanogénesis en un rango de 10 – 60 °C, tal que el proceso puede ser psicrófilico (10 – 25 °C), mesófilico (26 – 40 °C) y termófilico (41 – 60 °C).

i. Mesofílica

- ✓ 28 °C – 40 °C
- ✓ Menor vapor de agua en el gas
- ✓ Menor CO₂ en el gas
- ✓ Mayor cantidad de especies de metanógenas
- ✓ Estable frente a los cambios bruscos de temperatura

ii. Termofílica

- ✓ 41°C – 60 °C
- ✓ Mayor reactividad: Menor tiempo de retención

- ✓ Menor volumen de lodos formados
- ✓ Destrucción de microorganismos patógenos
- ✓ Mantenimiento óptimo de condiciones anaerobias
- ✓ Responde adversamente al enfriamiento accidental.
- ✓ Requiere gasto de energía adicional para elevar la temperatura.

f. Tiempo de retención

Fluctúa de acuerdo con la temperatura y tipo de sustrato. A 50 °C – 60 °C se necesitan 8 – 10 días para obtener 95 % del total de gas. A 20 °C – 30 °C se requieren 30 días. En la primera semana es mayor la producción de dióxido de carbono, mientras que a partir de la segunda semana es mayor el metano obteniéndose la máxima producción a los 16 días (**Barreto, G. y Córdova, J. 2012**).

A tiempos de retención mayores existe el riesgo de tener bacterias en fase de muerte siendo la degradación de la materia orgánica, lenta e ineficiente. A tiempos de retención menores existe el riesgo que las bacterias sean eliminadas del sistema antes que la velocidad de multiplicación alcance el estado estacionario. Los excrementos de porcinos, ricos en sólidos volátiles fácilmente degradables, necesitan tiempos de retención de 10 – 12 días, mientras que los excrementos de bovinos, ricos en materia celulósica y fibras difíciles de descomponer, requieren cerca de 20 días.

g. Ausencia de oxígeno

Agitación

Se debe realizar una agitación mecánica de 5 a 10 minutos dos veces al día.

h. Toxicidad

- ✓ Sulfatos
- ✓ Contaminantes industriales y agrícolas
- ✓ Antibióticos
- ✓ Desinfectantes, detergentes
- ✓ Metales pesados

2.3.5. Procesos de biodigestión

Los procesos importantes en la digestión anaerobia de la materia orgánica son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La etapa de hidrólisis es un proceso extracelular, donde las bacterias hidrolíticas excretan enzimas para la catálisis de moléculas orgánicas complejas como proteínas, celulosa y lípidos, formando unidades más simples como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol. En la segunda etapa, las bacterias fermentadoras acidogénicas convierten los compuestos orgánicos solubles de la hidrólisis en ácidos orgánicos como el acético, propiónico, butírico y alcoholes como el metanol. En la tercera etapa, los ácidos grasos y alcoholes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. A su vez, el etanol, ácido propiónico y butírico son transformados

en ácido acético por las bacterias acetogénicas. Finalmente, en la cuarta etapa o metanogénesis se produce el metano a partir del ácido acético o de mezclas de hidrógeno y dióxido de carbono, así como también de otros sustratos como ácido fórmico y metano (Varnero, M. 2011).

a. Fase I: Hidrólisis o de solubilización

Los compuestos orgánicos complejos son hidrolizados por un conjunto de enzimas: celulasas, amilasas, proteasas, lipasas, segregadas por los microorganismos, transformando polisacáridos a monosacáridos, proteínas a péptidos y aminoácidos, grasas a glicerina y ácidos grasos.

b. Fase II: Acidificante o acidogénesis

Los productos de bajo peso molecular o simples son adecuados como fuente de energía y carbono celular. En el interior de los microorganismos y por acción de endoenzimas son transformados en ácidos grasos de cadena corta y alcoholes liberando H_2 y CO_2 (compuestos complejos a compuestos de bajo peso molecular). Esta fase es llevada a cabo por los fermentadores primarios y los ácidos generados son acetato, propionato y butirato.

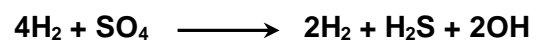
c. Fase III: Acetogénica o Acetogénesis

Llevada a cabo por bacterias obligadas productoras de protones o bacterias oxidantes de ácidos grasos productoras de H_2 o fermentadoras secundarias o acetogénicas estrictas, cuya única forma

de oxidar el NADH es mediante la liberación de H₂ a medida que se forma. Estas bacterias utilizan ácidos grasos y alcoholes como fuente de energía. En cultivo axénico apenas se desarrollan o no lo hacen en absoluto; sin embargo, crecen abundantemente cuando están asociadas a un organismo consumidor de H₂ (como un metanógeno o una bacteria reductora de sulfatos).

Esta dependencia se denomina SINTROFIA (comer juntos) **Carreño, 2012**). *Syntrophomonas wolfei* oxida ácidos grasos de 4 – 8 átomos de carbono principalmente butirato hasta acetato, CO₂ e H₂ cuando crece con una metanógena. *Syntrophobacter wolnii* oxida propionato hasta acetato, CO₂ e H₂ cuando crece con especies reductoras de sulfato.

Todo el H₂ y el CO₂ de los procesos fermentativos primarios es consumido inmediatamente por bacterias metanogénicas (para formar metano), bacterias homoacetogénicas como *Clostridium aceticum* y *Acetobacterium woodii* (para formar acetato) o por bacterias reductoras de sulfatos. En este último caso, la reducción de sulfatos a sulfuros (bacterias reductoras de sulfato como *Desulfovibrio*) afecta negativamente la metanogénesis (competencia por el H₂ y toxicidad debido al H₂S).



d. Fase IV: Metanogénica

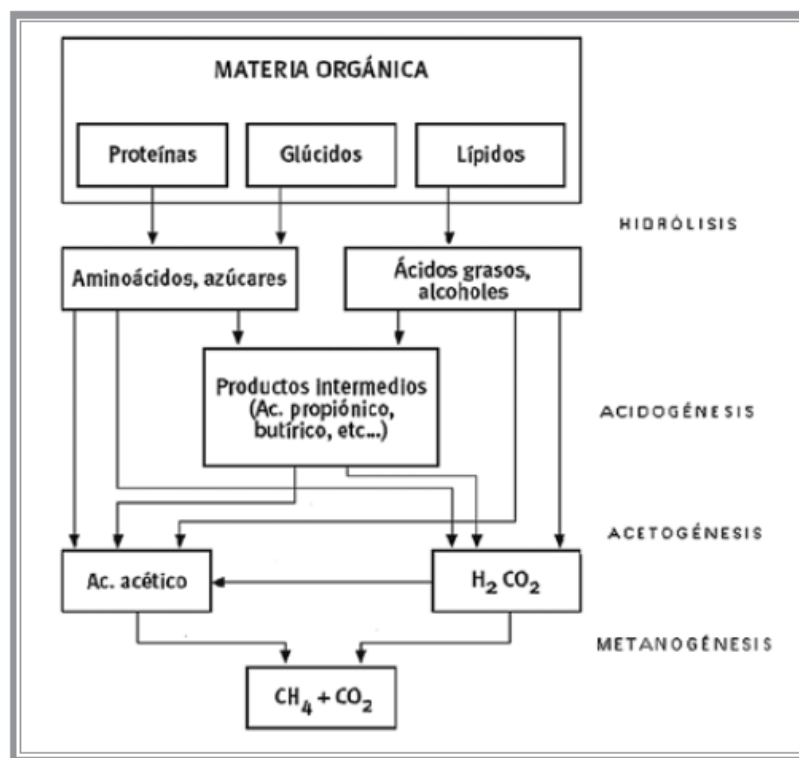
La metanogénesis es llevada a cabo por bacterias que viven en íntimo contacto con las acetogénicas y pueden ser oxidantes del hidrógeno o fermentadoras del ácido acético. El hidrógeno se usa como donador de electrones, con dióxido de carbono como aceptor, para formar metano, mientras que el ácido acético se escinde para formar metano y dióxido de carbono.

Se considera que la producción de metano es la estabilización ideal de la materia orgánica, porque posteriormente en aerobiosis se convierte en $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.



Los principales sustratos para la metanogénesis en la tierra y aguas dulces son el H_2 y el acetato. En el mar los sustratos metilados (metilaminas o metanol) son los precursores del metano. En general, en la naturaleza, los sustratos más importantes para la metanogénesis son el H_2 , acetato y CO_2 . **(Carreño, 2012)**. La figura 2.1 muestra las etapas de la formación de metano.

Figura 2. 1 Etapas de formación de metano



Fuente: Tchobanoglous, G. (1994)

2.3.6. Biodigestor

Los biodigestores conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y bioabono (**Arce, 2011**).

2.3.6.1. Tipos de biodigestores

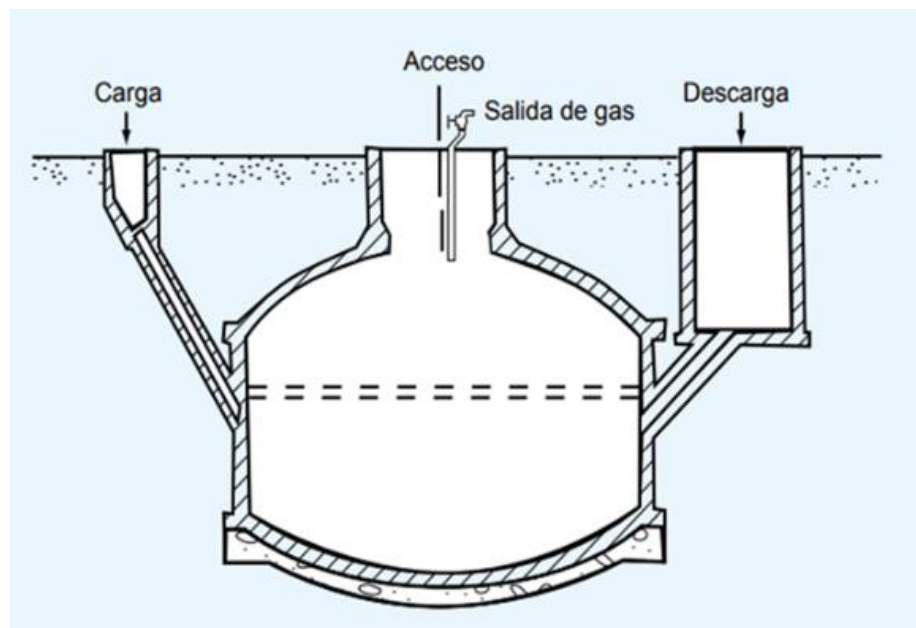
a) Biodigestor chino

Es una estructura que puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes; se puede adicionar el gasómetro. Este biodigestor permanece bajo la superficie favoreciendo a la fermentación, debido a la influencia

de los cambios de temperatura; pero la presión del gas depende del volumen acumulado **(Guevara, 1996)**.

Es un tipo de biodigestor con tanques cilíndricos donde el tanque y el piso tienen forma de arco y son totalmente enterrados (Figura 2.2) **(FAO, 2011)**.

Figura 2.2 Biodigestor Chino

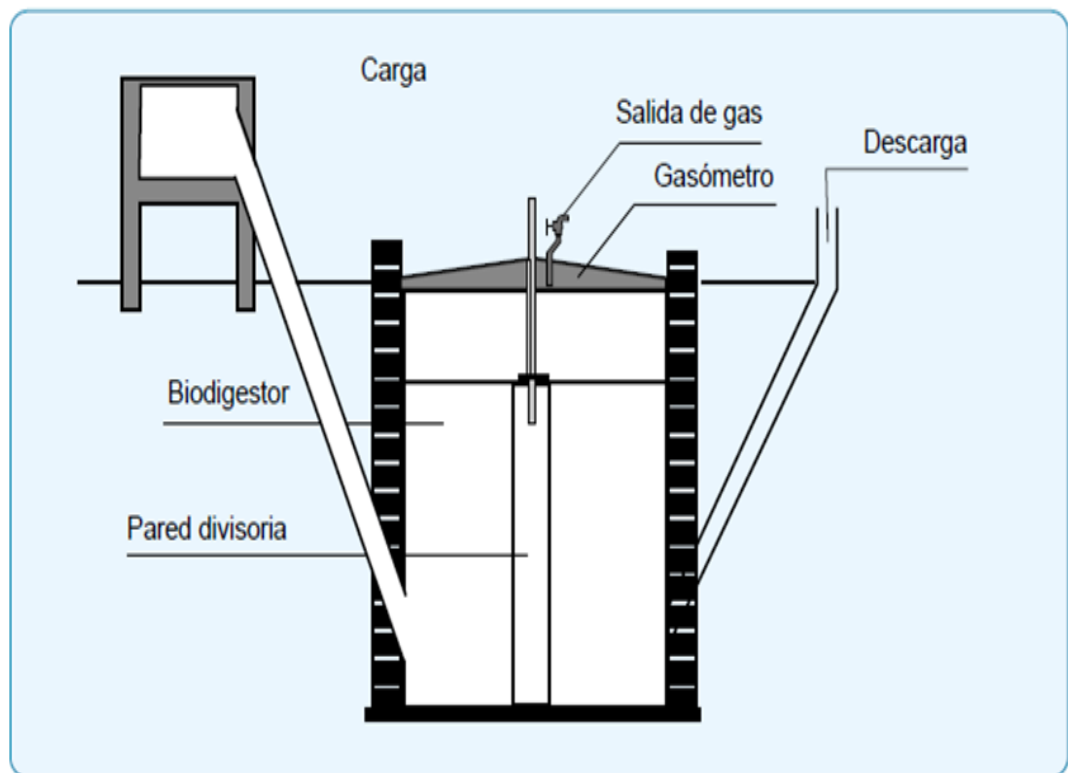


Fuente: FAO (2011)

b) Biodigestor indio

Es un tipo de biodigestor que permanece bajo la superficie y de forma vertical, el cual se carga por gravedad una vez al día dependiendo de la fermentación. Asimismo, produce biogás a diario en condiciones de operación estables. (Figura 2.3) **(FAO 2011)**.

Figura 2.3 Biodigestor Indio

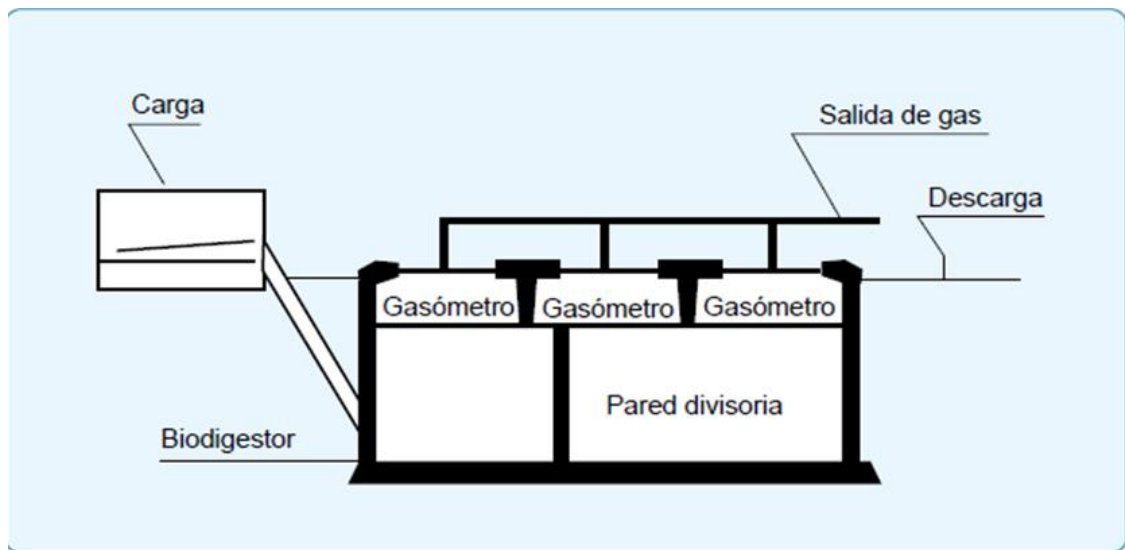


Fuente: FAO (2011)

c) Biodigestor horizontal

Es un tipo de biodigestor poco profundo de forma rectangular, es de concreto armado debido a las presiones a las que se somete (Figura 2.4). Esta estructura es usada mayormente para el saneamiento de descargas cloacales debido a que la forma facilita que el efluente pueda salir del digestor y al flujo pistón y tiempo de retención puedan degradarse (**Guevara, 1996**).

Figura 2.4 Biodigestor Horizontal



Fuente: FAO (2011)

d) Biodigestor Batch por lotes

Es un tipo de biodigestor al cual se carga una sola vez la materia orgánica y tiene una cúpula metálica con sello de agua. La estructura es en bloques y concreto reforzado; esta necesariamente hace uso de un gasómetro, y se ven afectados por la temperatura ambiental. Este biodigestor se utiliza para degradar materia orgánica sólida que contiene como restos de vegetales, desechos sólidos orgánicos, el requisito básico es utilizar una buena inoculación para garantizar una buena fermentación.

2.3.7. Biogás

El biogás es una mezcla de gases de diferentes características producidos por la fermentación de materia orgánica, como por ejemplo el estiércol y los residuos orgánicos. La composición química del biogás (Tabla 2.2) indica que el componente más abundante es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero. La mezcla de CH_4 con el aire es combustible y arde con llama azul. (Cepero, et al 2012)

Tabla 2 2 Composición química del biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje %
Metano	CH_4	40 – 70
Dióxido de carbono	CO_2	30 – 60
Hidrogeno	H_2	0,1
Nitrógeno	N_2	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxigeno	O_2	0,1
Sulfuro de hidrogeno	H_2S	0,1

Fuente: FAO (2011)

El biogás obtenido a partir de la fermentación (digestión) anaeróbica de los materiales orgánicos (estiércol), proporciona una temperatura que oscila desde los 700 a 870 °C. El gas producido durante los primeros 4 a 5 días, se debe dejar salir ya que contiene poco metano.

2.3.7.1. Factores que afectan la producción de biogás

Hay varios factores que intervienen directamente en la producción de biogás entre ellos tenemos:

- **Tipo de materia prima**

La cantidad y calidad de la materia prima (estiércol), influye principalmente de acuerdo con el peso del animal y al tipo de alimentación que consuman, de acuerdo con ello se favorecerá la obtención del biogás. La mezcla homogénea del estiércol de bovinos y porcinos a manejar favorece la producción de biogás.

- **pH**

El pH es un parámetro muy importante en la producción de biogás, nos indica cómo se desarrolla la fermentación en el biodigestor, el crecimiento microbiano y la obtención de metano. Para exista una buena actividad microbiana el pH debe estar 6.7 y 7.5 con límites de 6.5 a 8.0 (Tabla 2.3) (Monar, U. 2009).

Tabla 2. 3 Valores aproximados de pH y su efecto en la obtención de biogás

Efectos de pH en la producción de biogás	
Valor de pH	Efecto
7.0 – 7.2	Optimo
≥ 6.2	Retarda la acidificación
≤ 7.6	Retarda la amonización

Fuente: Carreño, 2012

- **Temperatura del sustrato**

Uno de los factores más importantes es la temperatura, debido a que, si aumenta la temperatura, menor será el tiempo de retención de la mezcla, dándonos como resultado final una buena población de bacterias metanogénicas, un proceso metabólico y una mejor descomposición del sustrato.

- **Velocidad de carga volumétrica**

La velocidad de carga volumétrica tiene relación directa con el volumen del biodigestor, tiempo de retención y el tipo de sustrato orgánico (estiércol + agua), al cargar diariamente en la cámara de digestión y se expresa en m³ de mezcla/día.

- **Tiempo de retención hidráulica (TRH)**

El volumen del sustrato orgánico que se carga diariamente al biodigestor está relacionado con el TRH, según se vaya aumentando la carga volumétrica se va a ir disminuyendo el TRH.

La temperatura es elemental para la obtención de biogás. Si la temperatura del sector donde se desarrollará el biodigestor es alta, el tiempo de retención va a ser bajo, logrando así que las bacterias degraden rápidamente el sustrato orgánico.

(García, J., y León, E. 2015).

- **Inhibidores**

Los iones metálicos son considerados inhibidores muy fuertes, estos compuestos inhiben la digestión afectando el proceso de fermentación,

asimismo la presencia de detergentes empleados en el aseo de los animales y los antibióticos empleados durante alguna dolencia de estos, en fijadas concentraciones pueden inhibir e incluso obstaculizar la digestión. **(Guillén, 2010).**

Antes de la obtención de la materia prima, se debe tomar en cuenta que a los animales en los últimos 6 meses no se les haya suministrado antibióticos o algún tipo de antiséptico **(García, J., y León, E. 2015).**

2.3.8. Producción de biogás

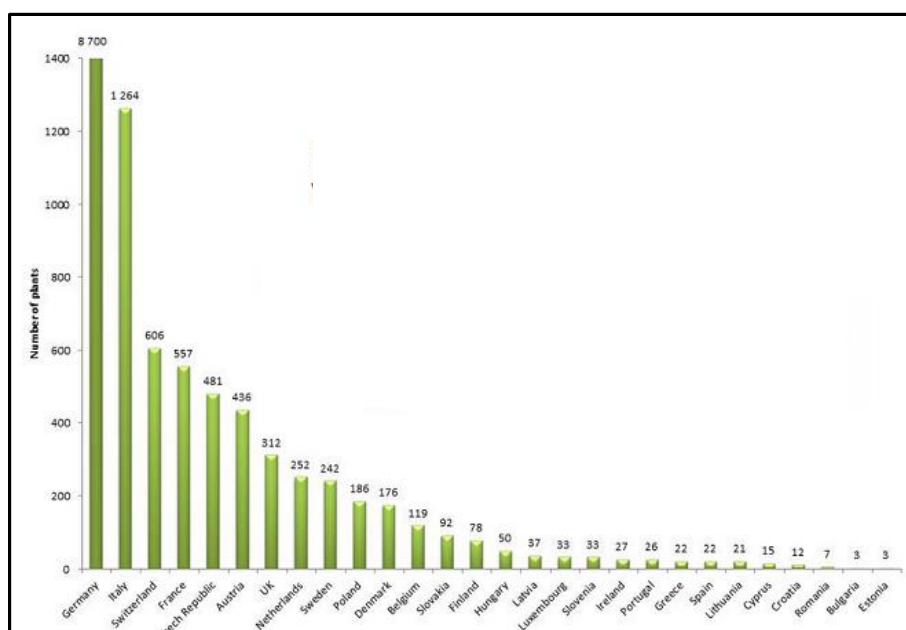
La energía es un elemento central del desarrollo de todos los países. Sin ella, los servicios esenciales como los establecimientos médicos y educativos se ven drásticamente afectados, y las empresas operan con muchas limitaciones. La energía es sinónimo de desarrollo de los pueblos, debido a que, sin ella, se limitarían muchas industrias. El acceso universal a un nivel asequible, confiable y sostenible de energía resulta esencial el desarrollo de los pueblos, y además constituye el eje de los esfuerzos para hacer frente al cambio climático.

Hoy en día, cerca de 1000 millones de personas aún viven sin electricidad, y cientos de millones más viven con un suministro insuficiente o poco confiable, asimismo aproximadamente 3000 millones de personas preferentemente que viven en las zonas rurales utilizan combustibles contaminantes como leña u otra biomasa para cocinar o calefaccionar sus viviendas, lo que genera contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados que tiene impactos generalizados en la salud y medio ambiente.

Las carencias son muy altas, pero se han logrado avances en muchos aspectos. El diagnóstico de la energía mundial se encuentra ante una transformación fundamental, y la energía renovable desempeña un papel cada vez más importante en el proceso de ayudar a los países a desarrollar sistemas energéticos modernos y seguros. **(Banco Mundial, 2018).**

De acuerdo con la última información disponible por la Asociación Europea de Biogás, en el año 2012, había en Europa 13.800 plantas de este combustible, lo que representaban 7.400 MW de capacidad instalada. Los países con mayor desarrollo eran Alemania, Italia, Suiza, Francia y la República Checa (Figura 2.5) **(European Biogas Association, 2018).**

Figura 2.5 Producción de biogás en países europeos, 2012



Fuente: European Biogas Association (2018)

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. ENFOQUE Y DISEÑO

3.1.1. Enfoque

El enfoque de la metodología de investigación a utilizar fue del tipo mixto; pues a partir del conocimiento a detalle del tratamiento de residuos orgánicos producidos la actividad agropecuaria se formuló procedimientos para lograr la producción de biogás a fin de minimizar los impactos ambientales y efectos negativos sobre el calentamiento global.

3.1.2. Diseño

La presente investigación utilizó un diseño descriptivo aplicativo debido a que se evaluó la producción de biogás a partir de la fermentación de la mezcla de residuos celulósicos, estiércol de vaca y estiércol de cerdo provenientes de la zona y se planteó su aprovechamiento por parte de la población, teniendo en cuenta los aspectos:

Cualitativo: Desarrollo de los fundamentos teóricos que se tomaron en consideración para la generación de biogás y la determinación de las características de los residuos agropecuarios de la zona en estudio.

Cuantitativo: Los cálculos que se realizaron tuvieron la naturaleza de experimental.

3.1.3. Nivel

El nivel de nuestra investigación fue correlacional, existe una relación directa entre las características de los residuos orgánicos agropecuarios y la producción de biogás.

3.1.4. Tipo

Corresponde al tipo básica – aplicada pues desde la perspectiva básica toma en cuenta los parámetros de formulación del tratamiento y los fundamentos teóricos normativos que disponen los parámetros y/o límites permisibles para garantizar la calidad del biogás para ser utilizado como fuente de energía.

3.2. SUJETOS DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación los sujetos de investigación son los siguientes:

- La biomasa orgánica que produce la actividad agropecuaria de la zona en estudio.
- El Biogás producido por el tratamiento de la biomasa teniendo en cuenta

el volumen de producción y calidad de este.

3.3. VARIABLES

Las variables de estudio son:

- Variable independiente (X): Residuos Orgánicos
- Variable dependiente (Y): Producción de biogás.

Los datos obtenidos se pasaron al programa Microsoft Excel, para realizar las tablas y figuras a fin de observar la dinámica de la producción de biogás en la investigación.

3.4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

El trabajo de investigación se llevó a cabo en una parcela ubicada a la entrada de Chulucanas a la altura del puente Ñácara carretera a Chulucanas, Km 50.

A. Trabajo de Campo

El estudio se realizó en dos fases.

- ✓ En la primera fase se obtuvo biogás por digestión anaerobia de residuos celulósicos, excretas de vaca y cerdo.
- ✓ En la segunda fase se determinó la cantidad de biogás producido y su aprovechamiento por los pobladores

B. Trabajo de Gabinete

- ✓ Procesamiento de la información obtenida in situ.
- ✓ Determinación de los procedimientos.
- ✓ Discusión de los datos.
- ✓ Redacción de la tesis.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

La información bibliográfica acerca de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos permitió formular un procedimiento para lograr el tratamiento de la biomasa orgánica.

Los instrumentos de los que nos valdremos para almacenar el biogás a partir de un biodigestor fueron básicos.

Se realizaron las mediciones, análisis químicos y cálculos necesarios para determinar volumen de producción, componentes, calidad, etc.

3.6. FUENTES

- ✓ La presente investigación requiere la revisión bibliográfica, normativa y procedimientos para comprender los parámetros necesarios para la producción de biogás.
- ✓ Recopilación de datos sobre la actividad microbiana en procesos fermentativos.

- ✓ Procesamiento de la información en gabinete y la implementación de los resultados.
- ✓ Evaluación de los resultados y formulación de recomendaciones

3.7. ASPECTOS ÉTICOS

La presente investigación está referida diseñar un procedimiento para el tratamiento de la biomasa orgánica de la actividad agropecuaria de la zona de estudio, con la finalidad de minimizar los impactos ambientales y consecuentes efectos sobre el calentamiento global, por tanto en ninguna circunstancia involucra trabajar con seres vivos de manera tal que la presente tesis está fuera de los alcances y posibilidades de incurrir en daño físico, moral y/o la dignidad de la persona. En tal sentido adjunto Declaración Jurada de Originalidad de Trabajo de Investigación

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISTRITO DE CHULUCANAS

La Ciudad de Chulucanas es la capital de la Provincia de Morropón, Departamento de Piura, y se encuentra ubicada a 5° 5'36" de Latitud Sur y a 80° 09' 3" de Longitud Oeste, a una altura de 92 m.s.n.m. Asimismo, está situada a 58 km. al este de la Ciudad de Piura, encontrándose en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río del mismo nombre.

Chulucanas es la ciudad más importante del Alto Piura, con el 6º rango jerárquico a nivel del Sistema Urbano de la Región Piura - Tumbes. Su tipología es de centro urbano complementario de servicios, asimismo constituye ciudad dormitorio de la ciudad de Piura. Actualmente ocupa un área de 405 hectáreas aproximadamente **(Plan Director de la Ciudad de Chulucanas, 2010)**.

Según los datos reportados por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) la población de Chulucanas se contabiliza en 80 200 habitantes aproximadamente, representando cerca del 45 % del total de la población de Morropón. A nivel provincial, el 55 % de la población es urbana y residiendo en ciudades, mientras que el 45 % es rural y reside en el campo según el censo de 1993. Los distritos que evidencian una población en mayor cantidad urbana en 1993 son Chulucanas (70 %); Salitral (66 %); Morropón (64 %); La

Matanza (62 %). San Juan de Bigote 53 % urbana y 47 % rural, y los distritos con población predominantemente rural son: Santo Domingo (89 %); Chalaco (88 %); Yamango (85 %); Santa Catalina de Mossa (69 %) y Buenos Aires (59 %) **(Plan Estratégico Morropón, 2010)**.

4.2. ACTIVIDADES AGRÍCOLAS

En la Provincia de Morropón se encuentra el Valle del Alto Piura, sus tierras fértiles y clima apropiado para el desarrollo de la agricultura son características de esta región. Tiene un área (Costa y Sierra) de 68,000 Has. de las cuales son irrigadas 41,875 has. y 26,125 has. aún no. La distribución del agua se efectúa a través de 10 comisiones de regantes que involucran a 14,000 usuarios y 28,000 has. las cuales regulan el agua a gravedad, provenientes de los afluentes del Río Piura. **(Diagnóstico Ambiental de la Provincia de Morropón, 2012)**.

Dentro de los principales problemas que aquejan a la región es la poca captación de agua de los afluentes, para regar sus cultivos. La mayor parte del agua de los afluentes se pierde porque no hay infraestructura de riego adecuada, tales como tomas de captación, compuertas, siendo de material rústico (cañas, palos, piedra y tierra). Esta situación que se agrava por la destrucción de tomas de captación ocurridas en el año 1998 por el Fenómeno “El Niño”, y que en 1999 y 2000 las fuertes lluvias han desviado el cauce del río, ocasionando que la mayor parte de las tomas de captación queden colgadas.

Entre los cultivos que tienen una mayor producción destacan: el arroz, que en los últimos años ha disminuido significativamente su producción,

obteniéndose en 1998 una producción de 59,241 Tm y en 1999 aumentó su producción a 29,976 Tm, abarcando para dicho año el 11.3 % de la producción total de Piura.

El Mango es uno de los principales cultivos de la región, se obtuvo en el año 1998 una producción de 45,634 Tm y en 1999 56,980 Tm, lo cual indica un aumento en la producción; este cultivo representó el 46.6% de la producción total de Piura el año 1999.

El Plátano cuya producción fue en 1998 de 14,103 Tm, inferior a la del año 1999 equivalente a 21,792 Tm; representa el 20.3 % de la producción total de plátano del departamento de Piura.

El Limón es uno de los cultivos de gran importancia en la zona; en 1998 su producción alcanzó 18,672 Tm y en 1999 25,624 Tm; el cual representó en dicho año, un aumento de más del 27% respecto al año anterior. El Limón en esta zona representó para 1999 el 21% de la producción del departamento de Piura.

Otro cultivo cuya producción aumentó en 1999 es el maíz amarillo duro con 24,175 Tm, respecto a 1998 que fue de 21,166 Tm. La producción de este cultivo fue del 41% del total del departamento de Piura.

Asimismo, en esta región se cultiva también: yuca, maíz amiláceo, frijol castilla, trigo, caña de azúcar; pero en menor escala. (Plan estratégico de desarrollo 2000 - 2010, Provincia de Morropón – Chulucanas)

4.3. ACTIVIDADES GANADERAS

En el sector ganadero la industria es muy incipiente, las crianzas más importantes son el ganado vacuno, ovino y porcino, mayormente de raza criolla y orientadas a la producción de carne que basan su alimentación en los forrajes del bosque y los rastrojos de la cosecha. Estas crianzas se caracterizan por sus bajos índices productivos y reproductivos. La producción de carne se comercializa al mercado regional y nacional. Se cuenta con un centro de acopio de ganado lugar donde se centra la comercialización de ganado en pie, tanto de Morropón como los distritos aledaños, esta actividad, aunque no es de rentabilidad elevada, constituye una fuente de ahorro muy importante para las familias rurales.

4.4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.4.1. Primera fase: Producción de biogás por digestión anaerobia de residuos celulósicos, excretas de vaca y cerdo

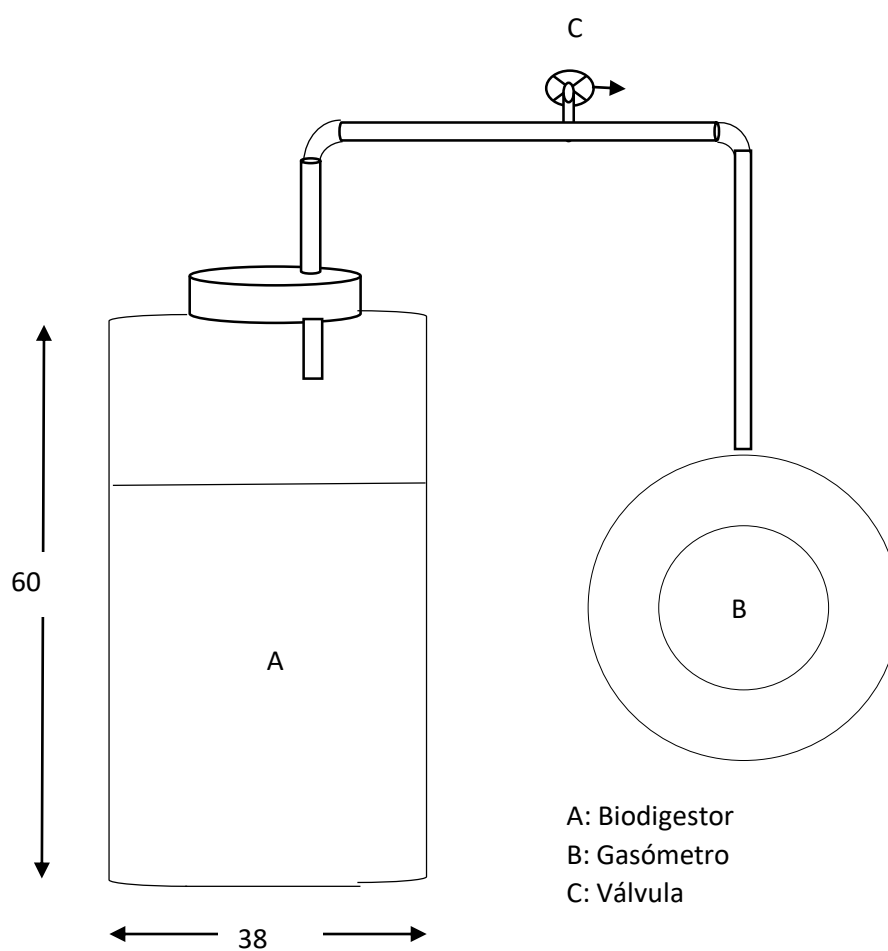
Con estos residuos orgánicos se llevó a cabo una biodigestión anaerobia para producir biogás la cual contiene metano entre otros gases.

4.4.1.1. Diseño y acondicionamiento del biorreactor anaerobio

Se acondicionó 3 biodigestores anaerobios (Figura 4.1). Cada biodigestor estuvo constituido por un tanque de polietileno con una capacidad de 20 litros, cuyas dimensiones fueron de 38 cm de ancho, 60 cm de largo. En el extremo superior del bioreactor se realizó una abertura de 10 cm de diámetro para la carga y descarga del bioreactor y un agujero que permitió la salida

del biogás a través de una manguera plástica de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y 1 $\frac{1}{2}$ metros de longitud que llevó el biogás producido para su almacenamiento en un gasómetro que estuvo localizado cerca al biodigestor constituido por una pelota de jebe que funcionó como un depósito (gasómetro).

Figura 4.1 **Diseño de biodigestor anaerobio para obtención de biogás**

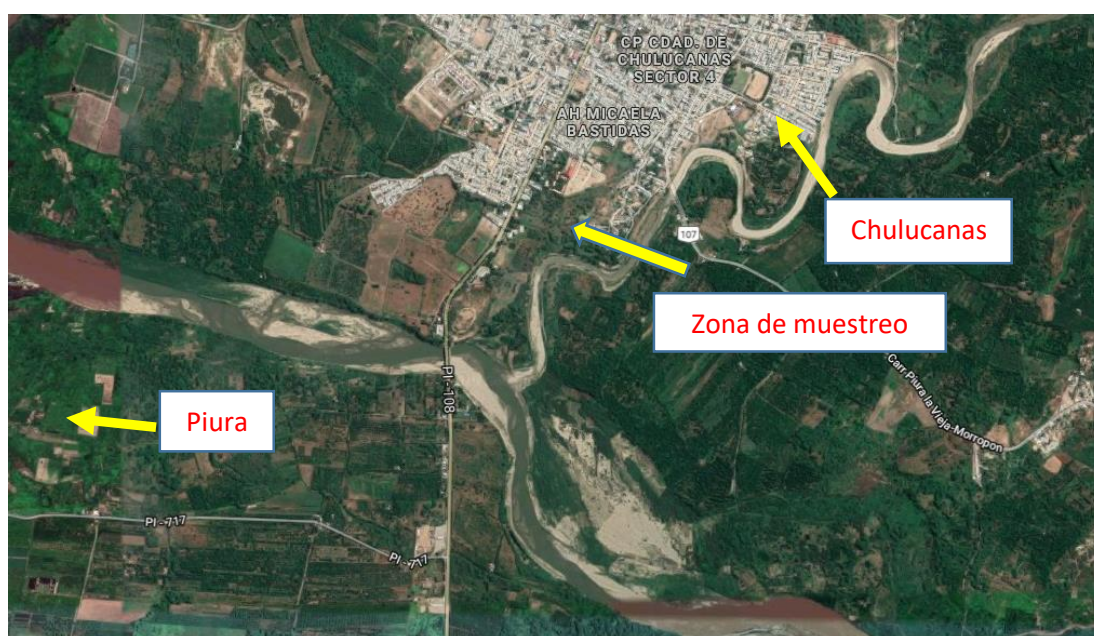


Fuente: Diseñado por el Tesista

4.4.1.2. Colección de la materia prima para la producción de biogás

Los residuos celulósicos (restos de hojas y frutos de banano, mango, cacao, limón), fueron colectados en parcelas de la provincia de Chulucanas ubicadas a la altura del puente Nácara (Figura 4.2) y posteriormente llevada a una parcela previamente acondicionada de la misma zona. El estiércol de cerdo y vaca fue colectado en los establos y lugares de crianza de la zona.

Figura 4. 2 Ubicación de la zona de muestreo, correspondiente al distrito de Chulucanas, provincia de Morropón



Fuente: Google Eart

4.4.1.3. Formulación de la mezcla de sustratos orgánicos con una relación de C:N de 25:1

Según la literatura consultada el porcentaje de Carbono y Nitrógeno en los residuos celulósicos es de 48 y 1 % respectivamente (Steiner, 2006), en el estiércol de cerdo es de 25 y 1.5 % respectivamente (Varnero, 2011) mientras que, en el estiércol de vaca es de 30 y 1.3 % respectivamente (Varnero, 2011). Conociendo estos datos se formularon las mezclas

adecuada de la biomasa de los residuos celulósicos, estiércol de vaca y cerdo para alcanzar una proporción de C:N de 25:1 según la capacidad del biodigestor de 20 L. (Anexo 1).

4.4.1.4. Preparación y pre-fermentación de la carga inicial para la producción de biogás

Una vez obtenido la relación C: N necesaria para la producción de biogás se mezcló el estiércol previamente desmenuzado por trituración con la biomasa de los residuos celulósicos (cortados en fragmentos de 0.03 – 0.05 mm). El material resultante fue mezclado con agua de cal al 2%. Para la pre-fermentación, la mezcla resultante se depositó en una tina plástica y se homogenizó interdiariamente durante 4 días. Posteriormente, la mezcla fue colocada sobre un plástico en la superficie del suelo para airear durante 6 días (Figuras 4.3 – 4.7).

Figura 4. 3 Parcelas de criaderos de cerdos en Chulucanas



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4.4 **Recolección de estiércol de cerdo para la obtención de biogás en Chulucanas**



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4. 5 **Recolección de residuos celulósicos para la obtención de biogás en Chulucanas**



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4. 6 Peso de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos para la mezcla correspondiente



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4. 7 Mezcla de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas



Fuente: Ilustración producida por el tesista

4.4.1.5. Digestión anaerobia para la producción de biogás

Después de la pre-fermentación se determinó el contenido de sólidos totales para realizar la dilución correspondiente con agua de cal al 2 % dado que un cultivo discontinuo requiere entre 25 – 35 % de sólidos totales (Sosa *et al.*, 1998), para llegar a este rango se realizó la dilución correspondiente adicionando agua de cal al 2%. Para este ensayo, por triplicado, los sustratos se pesaron y se determinó los sólidos totales iniciales de las mezclas utilizando el método gravimétrico (Oyuela, 2010) para lo cual se obtuvo 25 mL de cada muestra en recipientes de vidrio vacíos y secos de peso conocido, se determinó el peso húmedo P_A y se llevó a evaporación en estufa a 90 °C por 24 horas (Figura 4.8). Posteriormente se determinó la fase sólida (peso seco, P_S). Los sólidos totales iniciales se determinaron con la siguiente formula:

Figura 4. 8 Peso de mezcla de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos para cálculo de sólidos totales



Fuente: Ilustración producida por el tesista

$$\%ST = \frac{P_B}{P_A} \times 100$$

Después de obtener los valores de sólidos totales iniciales en la mezcla se determinó el volumen de agua de cal al 2% adicional requerido para alcanzar teóricamente 30 % de sólidos totales finales mediante la fórmula mencionada por Paredes (2009).

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

C_1 = Concentración inicial (sólidos totales iniciales)

V_1 = Volumen inicial (peso de sustratos orgánicos)

C_2 = Concentración final (30 %)

V_2 = Volumen final (Volumen inicial + volumen de agua adicional)

Una vez calculado el volumen adicional de agua, el contenido se homogenizó para tomar una muestra y determinar experimentalmente los sólidos totales finales alcanzados, siguiendo el método explicado anteriormente para comprobar que los valores obtenidos están en un rango de 25 – 35 % de sólidos totales, óptimos para una buena fermentación. Con el volumen del agua adicional obtenido en el experimento piloto se calculó el agua requerida para los biodigestores de 20 L.

4.4.2. Segunda fase: Cuantificación de biogás producido

Para medir el biogás según Acuña y León (1998), cada 5 días a partir del día 20 de iniciada la digestión anaerobia, el gasómetro fue presionado, tal que el biogás se desplace por una manguera de polietileno de 0,02 m de diámetro hacia un matraz de 1 L, conteniendo un volumen conocido de agua. El volumen de agua desplazado se midió y fue considerado equivalente al volumen de biogás presente en el gasómetro.

4.4.2.1. Proceso biológico

En este proceso actúan microorganismos vivos que degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, es decir en condiciones anaerobias. Estos microorganismos anaerobios al momento de descomponer la materia orgánica tienden a producir como producto final gases como metano, sulfuro de hidrogeno, anhídrido carbónico entre otros.

4.4.2.2. Preparación de la materia orgánica fermentable

El proceso biológico actuó sobre los residuos orgánicos provenientes del descarte (Biomasa) de residuos celulósicos. Además, para que este proceso sea efectivo se le agregó estiércol de ganado vacuno y estiércol de cerdo. Esta materia orgánica fue preparada por el investigador siendo homogénea en el tratamiento repetitivos, Agregándole agua de cal al 2% para que se produzca la fermentación anaerobia en los biodigestores (Figura 4.9).

Figura 4. 9 Mezcla de agua de Cal al 2% con estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos para la pre-fermentación.



Fuente: Ilustración producida por el tesista

4.4.2.3. Proceso de fermentación en los biodigestores

Debido al proceso de fermentación en los biodigestores con los residuos orgánicos incorporados se obtuvo productos finales tales como el biogás que es una mezcla de gases producto de la fermentación, es una energía renovable que puede ser útil para varios fines. Además, es de gran importancia para esta investigación porque de ello depende la viabilidad del proyecto. La fermentación de los residuos orgánicos se efectuó a temperatura ambiente y culminó en la producción del biogás.

4.4.2.4. Almacenamiento del biogás

Para el almacenamiento del biogás se utilizó inicialmente una cámara de llanta sustituyéndose posteriormente por una pelota de jebe grande (a fin de acumular mayor cantidad de biogás), la cual se conectó a una manguera

de 1/2 pulgada de diámetro que a su vez estuvo conectada al biodigestor (Figura 4.10)

Figura 4. 10 Biodigestores anaerobios y gasómetro para acumulación de biogás



Fuente: Ilustración producida por el tesista

4.4.2.5. Determinación del porcentaje de metano en el biogás producido por digestión anaerobia

Para determinar el porcentaje de metano en el biogás producido, se empleó el método del desplazamiento del agua, descrito por Acuña y León (1998). En un matraz herméticamente cerrado se tomó un volumen determinado de biogás por desplazamiento de un volumen similar de agua destilada. El matraz que contuvo el biogás formó parte de un sistema, donde se desplazó un volumen de hidróxido de sodio, NaOH 0,05 M. El dióxido de carbono (CO₂) contenido en el biogás reaccionó con el NaOH formando bicarbonato de sodio ($\text{NaOH} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{NaOHCO}_3$). A continuación, se midió el volumen de NaOHCO₃ y se consideró como

equivalente al volumen de CO₂ presente en el biogás, siendo metano (CH₄) el volumen restado.

4.5. RESULTADOS

4.5.1. Formulación de la mezcla adecuada de residuos celulósicos, excretas de vaca y cerdo con una relación C:N de 25:1

Teniendo en cuenta la relación C: N de cada sustrato se requirió 1,55 kg de estiércol de vaca, 1,25 kg de estiércol de cerdo y 0,85 kg de residuos celulósicos a fin de alcanzar una relación de C: N en la mezcla total de 25:1 (Tabla 4.1)

Tabla 4. 1 Relación de carbono/nitrógeno de cada uno de los sustratos y mezcla total

SUSTRATO	Peso (Kg)	C (%)	N (%)	Carbono (kg)	Nitrógeno (Kg)
Residuos celulósicos (%C=48; %N=1)	0.850	48.000	1.000	0.408	0.009
Estiércol de cerdo (%C=25; %N=1.5)	1.250	25.000	1.500	0.313	0.019
Estiércol de vaca (%C=30; %N=1.3)	1.550	30.000	1.300	0.465	0.020
TOTAL	3.650	103.000	3.800	1.186	0.047

Fuente: Elaborada por el tesista

$$C: N = 1.186 \div 0.047$$

$$C: N = 25.010548$$

Asimismo, la cantidad de sólidos totales obtenida fue de 35% con una humedad de 65 % de acuerdo con estos resultados se utilizó 12,7 kg de mezcla y 2,3 L de agua de Cal al 2% en biodigestores de 20 L de capacidad a fin de llegar a una concentración de sólidos totales finales de 30% con un volumen de trabajo de $\frac{3}{4}$ del volumen total correspondiente a 15 L (Tabla 4.2).

Tabla 4. 2 Porcentaje de humedad y sólidos totales de la mezcla de sustratos orgánicos y volumen de agua requerida para alcanzar 30% de sólidos totales finales

	Humedad (%)	Sólidos totales iniciales (%)	Cantidad de mezcla (kg)	Agua de cal al 2% (L)	Sólidos totales finales (%)	Volumen de trabajo (L)
Mezcla de sustratos	65	35	12,7	2,3	30	15

Fuente: Elaborada por el tesista

4.5.2. Producción de biogás a partir de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos

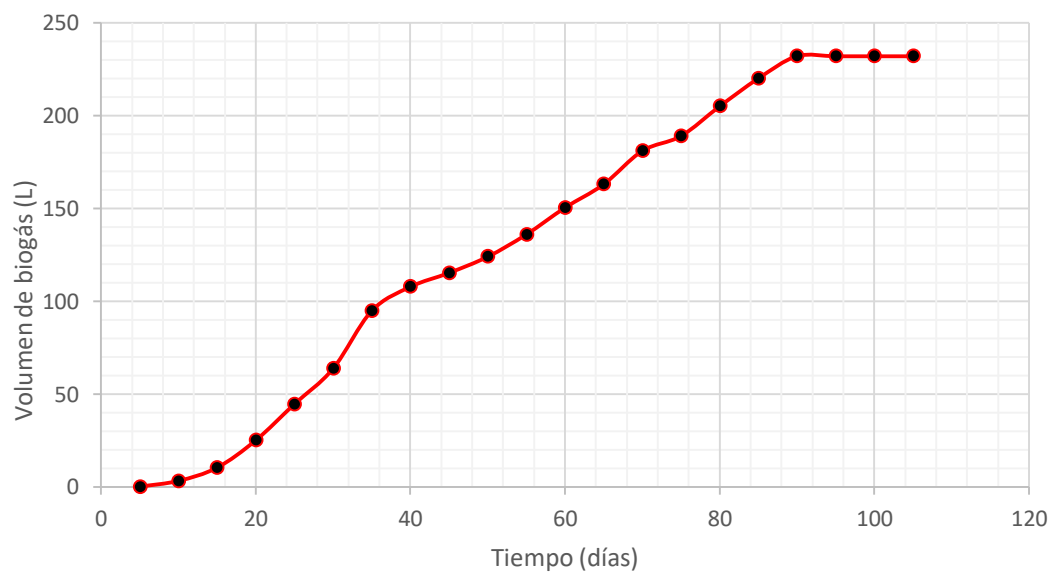
La producción de biogás por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos de celulósicos tuvo una duración de 90 días (Tabla 4.3 y Figura 4.11). El volumen de biogás osciló entre 0,20 y 232 L a los 20 y 90 días respectivamente de iniciada la digestión anaerobia. La temperatura de trabajo osciló entre 25 – 32°C, a su vez, el biogás obtenido presentó 65 % de metano y 35 % de CO₂. (Figuras 4.12 y 4.13).

Tabla 4. 3 Volumen de biogás producido por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas

Días después de iniciada la digestión anaerobia	Volumen de gas acumulado (L/5 días)
5	0.2
10	3.3
15	10.4
20	25.1
25	44.6
30	63.7
35	94.8
40	107.8
45	115.3
50	124
55	136
60	150.4
65	163
70	181
75	189
80	205
85	220
90	232
95	232
100	232
105	232

Fuente: Elaborada por el tesista

Figura 4. 11 Volumen de biogás producido por digestión anaerobia de excretas de cerdo, vaca y residuos celulósicos en Chulucanas



Fuente: Elaborada por el tesista

Figura 4. 12 Almacenamiento de biogás obtenido por fermentación de mezcla de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4. 13 Verificación de la capacidad combustible del biogás producido por fermentación de estiércol de vaca, cerdo y residuos celulósicos



Fuente: Ilustración producida por el tesista

4.5.3. Usos potenciales de biogás por parte de los pobladores de Chulucanas

Existen diversas operaciones para el uso del biogás, destacándose la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible (Figura 4.14 y 4.15).

Figura 4. 14 Capacitación a los pobladores sobre el proceso de obtención y usos de biogás



Fuente: Ilustración producida por el tesista

Figura 4. 15 Capacitación a los pobladores sobre el proceso de obtención y usos de biogás



Fuente: Ilustración producida por el tesista

4.5.3.1. Producción de calor

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación, este sistema sería muy beneficioso para los pobladores que no cuentan con acceso a la energía e iluminación. **(Varnero, 2011).**

4.5.3.2. Generación de electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso.

4.5.3.3. Combustible para vehículos

El uso vehicular del biogás es posible con la implementación de tecnología y se ha empleado desde hace tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que han sido acondicionados previamente para el uso del gas natural. La mayoría de los vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un

sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible. Si bien es cierto, esta tecnología podría ser remota, sin embargo; podría utilizarse en un futuro no muy lejano.

4.6. DISCUSIÓN

La acumulación de residuos producto de las actividades antropogénicas ha permitido el desarrollo de investigaciones a fin de proponer alternativas de solución minimizando el impacto generado por estos residuos y contribuyendo a solucionar problemas que aquejan a la población. Considerando que residuo hace referencia a un elemento que es desechado, dispuesto o que requiere de disposición final, de acuerdo con las normativas establecidas por cada país (**López et al., 2015**).

Así, el biogás es una buena alternativa de solución ante los escasos energética y acumulación de residuos agroindustriales, es considerada una mezcla gaseosa formada principalmente por metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material utilizado en la fermentación y del funcionamiento del proceso (**Varnero, 2011**). Sin embargo; para aumentar el rendimiento es necesario mejorar las características fisicoquímicas del proceso y tomando en cuenta la disponibilidad de la zona, se seleccionaron como fuentes de carbono y nitrógeno; estiércol de vaca, de cerdo y residuos celulíticos.

El estiércol es definido como las excreciones sólidas de los animales y constituye la fuente de materia orgánica más frecuentemente usada en procesos fermentativos (**Sierra y Rojas, 2005; García, A. 2000**). Asimismo, los residuos agroindustriales se definen como aquellos residuos orgánicos

obtenidos por las actividades agrícolas y ganaderas; en las actividades agrícolas de varios países no se realiza la disposición de residuos en un relleno o zona adecuada, siendo la opción más económica la quema descontrolada del material (**Chavez, A., y Rodriguez, A. 2016**) generando contaminación al medio ambiente. Esta actividad genera gran cantidad de residuos los cuales pueden ser aprovechados en beneficio de los agricultores (**Torres, 2012**).

El estiércol de vaca y cerdo, así como los residuos de celulíticos, resultaron adecuados para la producción de biogás, coincidiendo con **Rodríguez et al. (1997); López et al (2015) y Carreño (2012)**, respecto a que los sustratos adecuados para la metanogénesis pueden ser residuos orgánicos, entre los que están las excretas y los residuos celulósicos. Así también, **Castillo y Tito, 2011**, manifestaron que todos los residuos orgánicos (basura de cocina, restos vegetales, restos animales, aguas servidas, aserrines, virutas, bosta y excrementos) son adecuados para ser fermentados anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno).

Para la digestión, se realizó una mezcla de diferentes residuos orgánicos, según lo considerado por **Riquelme (2009)**, respecto a que el bioproceso se mejora con la mezcla de varios sustratos, debido al efecto sinérgico, es decir que un residuo puede aportar algo que otro no tiene. Asimismo, **Mejía (1996)** señaló que las características del sustrato suministrado al biodigestor anaerobio son de gran importancia, debido a que los requerimientos nutricionales de los microorganismos anaerobios son especiales por su lento metabolismo, así como también la regeneración de nuevas células también es muy baja. La fijación de los elementos nutritivos como el nitrógeno y el fósforo es escasa, no así el consumo de carbono que es transformado a metano y a dióxido de carbono.

La formulación de la mezcla de sustratos orgánicos se realizó a fin de alcanzar una relación C: N entre 20 - 30 y un contenido de sólidos totales que alcancen los 25 - 30 %, por cuanto estos son parámetros de operación que se fijan al inicio de la digestión anaerobia y señalan las condiciones con las cuales va a trabajar el sistema. Una relación C: N entre 9:1 y 25:1 es adecuada para el bioproceso (Oyuela, 2010). Sin embargo; una razón C/N de 30 (30 veces más carbono que nitrógeno) permite que la digestión se lleve a cabo a un ritmo óptimo, a condición de que las otras condiciones sean favorables (**Castillo y Tito, 2011**). El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias productoras de metano (metanogénicas).

El carbono además de ser constituyente básico es la fuente de energía para las bacterias metanogénicas mientras que el nitrógeno es requerido para la formación de nuevas células. **Sosa et al.** (1998) mencionaron un rango entre 10:1 hasta 30:1 en la relación C: N; no obstante, los mayores rendimientos se alcanzan entre 25 – 30. Cuando la relación es muy estrecha (10:1), se pierde el nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido y, si la relación es muy amplia (40:1), se inhibe el crecimiento de las bacterias, debido a la falta de nitrógeno. Valores mayores indican un exceso de carbono, que origina acumulación de ácidos volátiles y disminución del pH (acidificación). Por el contrario, valores menores indican un exceso de nitrógeno que se acumulará como amoníaco (amonificación); en ambos casos, el proceso de metanogénesis será afectado negativamente.

En la presente investigación se trabajó con un contenido de sólidos totales de 30% considerando que los sólidos presentes en el proceso afectan la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato la cual se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y

por lo tanto puede verse afectada la producción de biogás (Lijarza, Y. 2017). Por lo tanto, el porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante por considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. Así, la progresión del contenido de sólidos es el causante de que se reduzca el crecimiento de las bacterias metanogénicas en el sustrato, afectando la actividad y obtención de biogás (**García, Y. y Leon, E. 2015**). Según **Soria et al. (2001)** el porcentaje óptimo está entre 20 - 30 % y se consigue al diluir el material orgánico en agua.

La calidad de la digestión de los estiércoles varía según la cantidad de sólidos totales, debido a que estos son los que sirven de alimento a los microorganismos responsables de la digestión. Por ello, cuanto mayor sea la concentración de sólidos totales mayor será el contenido de nutrientes en la muestra. La dilución con agua de cal al 2% se realizó con la finalidad de evitar la acidificación del sistema puesto que la producción de biogás se debe mantener en un ambiente cuyo pH oscile entre 6.5 y 7.5 (**Cendales, 2011**).

Para la producción de biogás, se utilizó un biorreactor anaerobio con sistema discontinuo, coincidiendo con **Rojas (1992)**, **Acuña y León (1998)** y **Valencia et al. (2011)**. Este digestor se carga una vez y se descarga cuando se ha completado el proceso, siendo adecuado para bioprocesos a pequeña escala; sin embargo, también se pueden utilizar sistemas semicontinuos y continuos (**Varnero, 2011**; **Guevara, A. 1996**). Asimismo, el empleo de un gasómetro tipo pelota de jebe resultó adecuado para la acumulación del gas tal como lo reporta **Carreño, 2012**.

La cantidad de biogás producido en la presente investigación fue de 232 litros en 90 días de bioproceso, valor muy superior a lo indicado por Sarabia et al. 2016, quienes reportaron un volumen de biogás de 37,47 L usando excretas de borrego y lodos de aguas residuales. Así también **López et al. (2014)** quienes obtuvieron 0.52 litros de biogás en 217 días; sin embargo, ellos utilizaron únicamente residuos de frutas y verduras; asimismo lo reportado por **Castillo y Tito (2011)**, quienes obtuvieron 104 litros de biogás en 7 meses y 6 días de fermentación usando excremento de cuy, rastrojo del alimento vegetal de cuy y agua.

Un factor muy importante en la operación del biodigestor anaerobio es la temperatura, debido a que se tiene que favorecer un crecimiento bacteriano adecuado y aumentar la velocidad de las reacciones bioquímicas que se dan en el proceso (**Soria, et al. 2000; Varnero, 2011**). Este parámetro influyó directamente en la producción de biogás, la cual osciló entre 25 y 32 °C. **Lijarza, Y. (2015)** manifestó que este es uno de los factores que tiene mayor influencia en el proceso de la fermentación anaerobia, debido a que altera la actividad de las enzimas, y por lo tanto, varía la velocidad del proceso de digestión. Estas variaciones de temperatura pueden traer consigo cierta inestabilidad durante la producción de gas metano (CH₄) e incluso influir en el desarrollo de microorganismos. **Varnero, (2011)** indica que existen tres rangos de temperatura establecidos para el desarrollo del proceso; psicrófilico (<25°C), mesófilico (entre 25 °C y 45 °C) y termófilico (>45°C). De acuerdo con el rango en el cual se realiza el proceso, se presenta la influencia directa de la temperatura sobre la razón máxima de crecimiento de los microorganismos metanógenos. Adicionalmente, la temperatura afecta otros parámetros bioquímicos y fisicoquímicos del proceso como la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio de cada una de

las reacciones químicas, la solubilidad de los gases generados en el proceso y el pH. En la presente investigación el rango mesofílico resultó adecuado para una óptima producción de biogás, coincidiendo con **Carreño (2012)**, **Salazar et al. (2012)** y **Bedolla y Chaparro (2016)**.

El biogás obtenido presentó 65 % de metano, valor que se encuentra en el rango de 55,4 – 97,6 %, reportado por **Valencia et al. (2011)** para biogás obtenido por digestión anaerobia del contenido del estómago bovino o desecho ruminal. A su vez, **Acuña y León (1998)**, **Rojas (1992)** y **Aguilar y Botero (2006)** definen el biogás como una mezcla de gases, cuya composición varía según la biomasa utilizada; sin embargo, mayoritariamente está constituido por 40 – 70 % de metano, además de 30 – 60 % de dióxido de carbono, 0 – 3 % de sulfuro de hidrogeno, 0 – 2 % de amoniaco, 0 – 1 % de hidrogeno molecular y trazas de nitrógeno, monóxido de carbono y vapor de agua.

CONCLUSIONES

- 1) Se evaluó la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo, vaca y residuos celulíticos durante el proceso fermentativo.
- 2) Se determinó que el tiempo máximo de producción de biogás bajo las condiciones descritas en la presente investigación fue de 90 días.
- 3) Se evaluó la calidad del biogás a través del porcentaje de metano el cual se encuentra dentro de los parámetros establecidos.
- 4) Se planteó los usos potenciales del biogás a los pobladores que viven alrededor a través de charlas, concientizándolos sobre la problemática ambiental y beneficios que podrían obtener de su uso.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda hacer un monitoreo del pH al proceso fermentativo a fin de evitar la acidificación del sistema.
- 2) Analizar la presencia de microorganismos tanto al inicio y al final del proceso de digestión anaerobia.
- 3) Establecer un sistema de purificación de biogás obtenido, a fin de aumentar su calidad, sobre todo por la presencia de sulfuro de hidrógeno
- 4) Realizar un análisis fisicoquímico más detallado como son la determinación de DQO, ácidos grasos volátiles, relación C/N, porcentaje de Humedad, de cada uno de los componentes que conformarán la mezcla fermentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, Y., Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspecto teóricos parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).
2. Acuña, A., León, P. (1998). Evaluación de parámetros en la obtención de biogás en una planta piloto. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú.
3. Aguilar, F. & Botero, R. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra tropical*, 2(1), 15-25.
4. Arce, J. (2011). Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicables de las zonas agrarias del litoral. (Tesis de Licenciatura. Universidad Politecnica Salesiana sede Guayaquil. Ecuador.
5. Banco Mundial. Energía (En línea) fecha de acceso: 14 de julio de 2019. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
6. Barreto, G. & Córdova, J. (2012). Bacterias aisladas del Dren 4000 para la obtención de proteína a partir de metano producido con excretas de *Cavia porcellus* "cuy" y residuos lignocelulósicos en Lambayeque. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
7. Blanco, D. et al. 2012. Manual para el diseño, montaje y operación de digestores de cúpula fija. Una alternativa para Cuba. Estación Experimental "Indio Hatuey", Matanzas, Cuba. 35 p.

8. Castillo, D., Tito, C. (2011). Obtención de Biogás a Partir de Excremento de Cuy en Condiciones Ambientales en Tacna Perú. Revista Ciencia y Desarrollo. Vol. 13, pp. 84-91.
9. Carreño, C. (2012). Manual de Prácticas de Microbiología en el tratamiento de Desechos. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
10. Camacho, M. S. (2012). Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias de la provincia. (Tesis de grado). Universidad Alas Peruanas, Abancay, Perú.
11. Cárdenas, J. 2012. Evaluación de la calidad de biogás y biol en digestores utilizando estiércol de vaca y residuos orgánicos del comedor pretratados con la técnica del bocashi en la UNALM. Tesis. Universidad Nacional Agraria La Molina.
12. Chavez, A., y Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. Revista Académica y Virtual. 9(2) pp 2016.
13. Cendales, E. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
14. Cepero, L. et al. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. Revista Pastor y Forrajes. Vol 32. N° 2. pp 219-226.
15. Consejo Nacional del Ambiente, CONAM. (2006). *Guía Técnica para la Formulación e Implementación de Planes de Minimización y Reaprovechamiento de Residuos Sólidos en el Nivel Municipal*. Lima: Solvima Graf S.A.C.

16. Cueva, L. (2012). Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua. (Tesis de grado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
17. European Biogas Association. (En línea) Recuperado el 14 de julio de 2019. Disponible en: http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2019/05/EBA_report2018_abriged_A4_vers12_220519_RZweb.pdf
18. García, A. (2000). Calidad alimentaria de la mezcla de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol para bovinos de engorde. (Tesis de titulación) Universidad de Colima, México.
19. Guevara, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Lima.
20. Guevara, C., Arenas, H., Mejía, A., & Peláez, C. (2012). Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo. Información Tecnológica. Vol. 23(2), 19-30, doi: 10.4067/S071807642012000200004
21. Guillén, R. (2010), Caracterización de los Parámetros de Operación de los Biodigestores a Escala del Instituto Tecnológico de Costa Rica. (Tesis) Instituto Tecnológico de Costa Rica., Escuela de Biología., Cartago–Costa Rica.
22. Jaramillo, J y Zapata, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Especialización en Ingeniería Ambiental.
23. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Disponible en: https://www.regionpiura.gob.pe/documentos/planes/pdrc_piura_2021_vf2.pdf
24. López, et al. (2015). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles en la ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional, México.

25. Magaña, J., Torres, E., Martínez, M., Sandoval, C., & Hernández, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. Acta Universitaria. Vol. 16, núm. 2, pp. 27-37.
26. Ministerio del Ambiente, MINAM (2009). Informe anual de residuos sólidos municipales en el Perú, Gestión 2009. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.redrssi.pe/material/20101021020345.pdf>
27. Monar, U. (2009). Diseño de un Biodigestor para una Finca del Recinto San Luis de las Mercedes del cantón las Naves – provincia de Bolívar., (Tesis) Universidad Escuela Superior Politécnica del Litoral., Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción., Guayaquil – Ecuador., 2009.
28. Municipalidad Provincial de Morropón Chulucanas (2012). Diagnóstico Ambiental de la Provincia de Morropón.
29. Oyuela, F. (2010). Evaluación de la producción de biogás y biol a partir de la torta de Jatropha curcas L. (Tesis de grado). Universidad Zamorano, Honduras.
30. Paredes, A. (2009). Diseño de plantas de biogás (Primera parte - dimensionado de un biodigestor básico). Lima, Perú.
31. Plan estratégico de desarrollo 2000-2010, Provincia de Morropon – Chulucanas. Disponible en: https://www.regionpiura.gob.pe/documentos/planes/pdrc_piura_2021_vf2.pdf
32. Rodríguez, H., Córdova, A. (2006). Manual de compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos urbanos. Ecuador: ciencia.
33. Rojas, S. (1992). Diseño y construcción de una planta de biogás para dotar de energía a un laboratorio. Tesis Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
34. Sánchez y Reyes (2005). Metodología y diseños en la investigación científica. Lima Perú.

35. Salazar, G. (2004). Uso de los desechos de origen animal en México. Consultado el 12 de abril del 2016, de <http://www.fao.org/ag/frg/APH134> .
36. Salazar, J., Amusquivar, C., Llave, J., & Rivasplata, C. (2012). Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna. Lecture, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.
37. Sosa, R., Chao, R., Del Rio, J. (1998). Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuos agrícolas con producción de biogás. Habana: Instituto de Investigación Porcina. Recuperado de <http://www.slan.info.ve/porcinos/rev62/fjhtm>.
38. Steiner, R. (2006). Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica. Utilización residuos orgánicos en Costa Rica. pp.74.
39. Tchobanoglous G., H., Theisen Y S., Vigil, 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Mcgraw-Hill. Isbn 04-481-124.
40. Valencia, E., Valenzuela, E., Gonzales, S. & Vargas, C. (2011). Digestión anaeróbica de rumen bovino en laboratorio y determinación química pre y post tratamiento. Livestock, 23 (2), 1 – 12.
41. Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile, pp. 34.

ANEXOS

Anexo 1 Determinación de la relación C:N (Rodríguez y Córdova, 2006)

- a. Realizar un cuadro para anotar lo datos.
- b. Anotar en la columna "PESO" el correspondiente a los residuos. Este peso debe ser el que posean los residuos húmedos, pero sin escurrir.
- c. Para cada residuo multiplicar el "PESO" por el "% N", dividir entre 100 y anotar en la columna "N".
- d. Para cada residuo multiplicar el "PESO" por el "% C", dividir entre 100 y anotar en la columna "C".
- e. Sumar los valores de la columna "PESO" y anotar el total en la fila "Suma".
- f. Sumar los valores de la columna "N" y anotar el total en la fila "Suma".
- g. Sumar los valores de la columna "C" y anotar el total en la fila "Suma".
- h. Dividir la suma de la columna "C" entre la suma de la columna "N" y anotar el resultado en la casilla "C: N"
- i. Si la relación C: N no se encuentra dentro de los intervalos recomendados, para cada uno de ellos, se deberá añadir o reducir alguno de los componentes y proceder a realizar nuevamente el cálculo hasta que los valores se ajusten en los intervalos recomendados.

SUSTRATO	Peso (Kg)	Carbono (kg)	Nitrógeno (Kg)
Residuos celulósicos (%C=48; %N=1)	0.850	0.408	0.009
Estiércol de cerdo (%C=25; %N=1.5)	1.250	0.313	0.019
Estiércol de vaca (%C=30; %N=1.3)	1.550	0.465	0.020
TOTAL	3.650	1.186	0.047

$$C: N = 1.186 \div 0.047$$

$$C: N = 25.010548$$